

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RETROALIMENTADO
DE CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y
VARIABLE**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

AUTOR: MARIO ISRAEL HIDALGO CAJAS

TUTOR: ING.EDUARDO SANCHEZ, MSc.

QUITO

2012

APROBACIÓN DEL TUTOR

Certifico que el trabajo de graduación titulado “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA RETROALIMENTADO DE CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE”, es original y ha sido desarrollado por el señor Mario Israel Hidalgo Cajas, bajo mi dirección y conforme a todas las observaciones realizadas.

En la ciudad de Quito, a los 11 días del mes junio de 2012

Ing. Eduardo Sánchez. Msc.

Tutor

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA

Yo, MARIO ISRAEL HIDALGO CAJAS en calidad de autor del trabajo de graduación realizada sobre DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA RETROALIMENTADO DE CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen a de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con los establecido en los artículos 5,6,8,19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 12 días del mes julio de 2012

Mario Hidalgo

1719992545

tj_siglo21@hotmail.com

A Dios, porque siempre guía mis pasos en el camino de la vida.

A mi madre, Maria Uvaldina, gracias a su apoyo incondicional, consejos y amor he logrado alcanzar los objetivos en la vida.

A mis hermanas, Belén y Viviana, por su confianza.

A mis grandes amigos, Julio Sosa y Daniel González por siempre demostrar sinceridad y aprecio.

A todos mis amigos y amigas que siempre hicieron la diferencia en mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mi familia que siempre me ha brindado su Apoyo.

A los Docentes de la Facultad de Ingeniería Química, que con su guía, conocimientos y muchas veces consejos, nos ha enseñado a ser grandes profesionales y lo más importante ser personas de valía.

Al Club los Chillos que me permitió laborar durante muchos años en sus instalaciones.

CONTENIDO

	pág.
PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA.....	iii
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE ANEXOS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	1
1. CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS	3
1.1 Sistema automático de control.....	3
1.2 Sistemas de control.....	3
1.3 Estrategias de control	4
1.3.1 <i>Control por retroalimentación</i>	4
1.4 Control Pid (Proporcional Integral Derivativo)	6
1.4.1 <i>Acción Proporcional</i>	7
1.4.2 <i>Acción Integral</i>	7
1.4.3 <i>Acción Derivativa</i>	7
1.5 Instrumentos de control.....	8
1.5.1 <i>Electroválvula proporcional servoaccionada de 2 vías</i>	8

1.5.1.1 <i>Funcionamiento de la electroválvula</i>	9
1.5.1.2 <i>Partes de una electroválvula</i>	10
1.5.2 <i>Sensor Ultrasónico</i>	12
1.5.2.1 <i>Funcionamiento del sensor ultrasónico</i>	13
1.5.2.2 <i>Margen de detección de un sensor de ultrasonido.</i>	14
1.5.2.3 <i>Reflexión de la señal</i>	15
1.5.3 <i>Bomba centrífuga</i>	16
1.5.3.1 <i>Funcionamiento de una bomba centrífuga</i>	16
1.5.3.2 <i>Partes de una bomba centrífuga</i>	18
1.5.3.3 <i>Descripción de piezas de una bomba centrífuga</i>	19
1.5.4 <i>Tarjeta de control</i>	23
1.5.4.1 <i>Adquisición de señales</i>	23
1.5.4.2 <i>Proceso de señales</i>	23
2. SOFTWARE DE CONTROL LABVIEW	25
2.1 <i>Panel frontal</i>	25
2.2 <i>Diagrama de bloques</i>	25
2.3 <i>Paletas de trabajo</i>	26
2.4 <i>Desarrollo de una VI (Virtual Instruments)</i>	28
3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL	31
3.1 <i>Desarrollo del modelo matemático</i>	31
3.2 <i>Estructura física del proceso de control</i>	38
3.3 <i>Implementación del sistema de control</i>	38
3.3.1 <i>Implementación dela simulación del sistema de control en computadora</i>	39
3.3.1.1 <i>Implementación de PID y función de transferencia</i>	39
3.3.1.2 <i>Implementación de las herramientas virtuales para el control de proceso</i> ...	43
3.3.2 <i>Implementación del sistema de control en el equipo</i>	55
4. CÁLCULOS Y RESULTADOS	65

4.1 Cálculo modelo para el agua de la funcion de transferencia con alimentacion continua	65
4.1.1 Cálculo del caudal máximo para la válvula q_{max}	66
4.1.2 Cálculo del Área del reservorio	66
4.1.3 Cálculo de la constante $C1$	66
4.1.4 Calculo de T_p	67
4.1.5 Calculo de k_p	67
4.1.6 Cálculo de los periodos críticos	68
4.1.7 Cálculo de la función de transferencia para el sistema	68
4.2 Cálculo del control proporcional integral derivativo	69
4.2.1 Cálculo de acción proporcional k_p	69
4.2.2 Cálculo de la acción integral k_i	69
4.2.3 Cálculo de acción derivativa k_d	69
4.3 Cálculo modelo para el agua de la funcion de transferencia con alimentacion variable	69
4.3.1 Cálculo del caudal máximo para la válvula q_{max}	70
4.3.2 Cálculo del Área del reservorio	70
4.3.3 Cálculo de la constante $C1$	71
4.3.4 Cálculo de T_p	71
4.3.5 Cálculo de k_p	72
4.3.6 Cálculo de los periodos críticos	72
4.3.7 Cálculo de la función de transferencia para el sistema	72
4.4 Resultados	74
4.4.1 Resultados del modelo matemático para agua con alimentación continúa	74
4.4.1.1 Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación continua	75
4.4.1.2 Resultados de la variable nivel para agua con alimentación continúa	76
4.4.2 Resultados del modelo matemático para el alcohol con alimentación continúa	79

4.4.2.1 Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación continua	80
4.4.2.2 Resultados de la variable nivel para alcohol con alimentación continua	81
4.4.3 Resultados del modelo matemático para agua con alimentación variable	84
4.4.3.1 Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación variable	85
4.4.3.2 Resultados de la variable nivel para agua con alimentación variable.....	86
4.4.4 Resultados del modelo matemático para el alcohol con alimentación variable	89
4.4.4.1 Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación variable	90
4.4.4.2 Resultados de la variable nivel para alcohol con alimentación variable	91
5. DISCUSIÓN	94
6. CONCLUSIONES	96
7. RECOMENDACIONES	98
CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	100
BIBLIOGRAFIA	102

LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Piezas de una electroválvula.....	11
Cuadro 2. Partes constitutivas de una bomba centrífuga	19
Cuadro 3. Componentes para el proceso de control	38

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Datos para el cálculo de la función de transferencia	65
Tabla 2. Datos para el cálculo de la función de transferencia*	70
Tabla 3. Resultados del modelo matemático para agua con alimentación continua ...	74
Tabla 4. Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación continúa	75
Tabla 5. Resultados del variable nivel para agua con alimentación continua.....	76
Tabla 6. Resultados del modelo matemático con alimentación continua para alcohol.....	79
Tabla 7. Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación continúa	80
Tabla 8. Resultados del variable nivel para alcohol con alimentación continua	81
Tabla 9. Resultados del modelo matemático con alimentación variable para agua ...	84
Tabla 10. Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación variable	85
Tabla 11. Resultados del variable nivel para agua con alimentación variable.....	86
Tabla12. Resultados del modelo matemático con alimentación variable para alcohol.....	89
Tabla 13. Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación variable	90
Tabla 14. Resultados del variable nivel para alcohol con alimentación variable	91

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado.....	4
Figura 2. Diagrama en bloques de un control PID.	6
Figura 3. Campo producido por una bobina.....	9
Figura 4. Tensión - caudal de una electroválvula	10
Figura 5. Electroválvula proporcional servoaccionada de 2 vías	10
Figura 6. Sensor ultrasónico	12
Figura 7. Principio de funcionamiento de los sensores ultrasónicos	13
Figura 8. Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido.....	14
Figura 9. Margenes de detección de un sensor de ultrasonido	15
Figura 10. Reflexión de la señal.....	15
Figura 11. Succion y expulsión de fluido en una bomba centrifuga.....	16
Figura 12. Bomba Centrifuga, disposición, esquema y perspectiva	18
Figura 13. Partes constitutivas de una bomba centrifuga	18
Figura 14. Tipos de impulsores.....	20
Figura 15. Flecha de una bomba centrifuga	20
Figura 16. Diferentes tipos de baleros o rodamientos	21
Figura 17. Diferentes tipos de anillos de desgaste	21
Figura 18. Bomba con acoplamiento compacto (montada en el motor)	22
Figura 19. Tarjeta de control.....	23
Figura 20. Proceso S.A.D	24
Figura 21. Panel frontal de labview.....	25

Figura 22. Diagrama de bloques de labview	26
Figura 23. Paleta de trabajo en modo de ejecución.....	27
Figura 24. Paleta de trabajo en modo de ejecución.....	27
Figura 25. Panel frontal de la VI.....	28
Figura 26. Pop-menú de labview	29
Figura 27. Diagrama de bloques de la VI.....	30
Figura 28. Sistema de Control	31
Figura 29. Diagrama de bloques que representa el sistema	35
Figura 30. Diagrama de bloques simplificado con el cambio de variable	35
Figura 31. Diagrama de bloques del sistema con un control PID	36
Figura 32. Subpaleta Control Desing&Simulation.....	39
Figura 33. Diagrama de bloques para PID y función de transferencia	40
Figura 34. Paleta Controls	41
Figura 35. Función de transferencia (panel frontal)	42
Figura 36. Paleta Funtions.....	43
Figura 37. Paleta Control	44
Figura 38. Herramienta virtual del reservorio.....	45
Figura 39. Herramienta virtual para el reservorio (panel frontal)	45
Figura 40. Herramienta virtual de control PID.....	46
Figura 41. Herramienta virtual de control PID (panel frontal).....	47
Figura 42. Menu para guardar una VI	48
Figura 43. Herramienta virtual para el control proceso	49
Figura 44. Herramienta virtual control de proceso(panel frontal)	50
Figura 45. Función de Transferencia	51
Figura 46. Altura en función del tiempo (panel frontal)	52
Figura 47. Nivel del Tanque	53
Figura 48. Conexión de las herramientas virtuales control de proceso, PID y función de transferencia.....	54

Figura 49. Sistema de control en el equipo.....	55
Figura 50. Sistema de control en el equipo.....	56
Figura 51. Diagrama de bloques para la interface de comunicación	57
Figura 52. Subpaleta control desingn&simulation.....	58
Figura 53. Diagrama de bloques para el control PID en el equipo	59
Figura 54. Diagrama de bloques para la función de transferencia	60
Figura 55. Subpaletas Modern-Numeric	61
Figura 56. Herramienta virtual de control en el equipo (panel frontal)	62
Figura 57. Función de Transferencia en el equipo (panel frontal)	63
Figura 58. Altura como función del tiempo en el equipo (panel frontal).....	64

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación continua	77
Gráfico 2. $h, \text{cm}=f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación continua	78
Gráfico 3. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación continua	82
Gráfico 4. $h, \text{cm}=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación continua	83
Gráfico 5. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación variable	87
Gráfico 6. $h, \text{cm}=f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación variable	88
Gráfico 7. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación variable	92
Gráfico 8. $h, \text{cm}=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación variable	93

LISTA DE ANEXOS

	pag.
ANEXO A. MANUAL DE USUARIO SIMULACIÓN EN COMPUTADORA	105
ANEXO B. MANUAL DE USUARIO PARA EL EQUIPO.....	108
ANEXO C. EQUIPO	113

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RETROALIMENTADO DE CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE

RESUMEN

Se desarrollo e implemento un sistema de control de nivel de líquidos con retroalimentación para ser utilizado en el laboratorio de control automático como material didáctico.

Para lo cual, se realizo inicialmente una simulación del sistema de control utilizando el software labview. A partir de esta información se continuó con el desarrollo del sistema basado en un control proporcional integral derivativo y función de transferencia del sistema. Para implementar el sistema de control en un tanque, se utilizo un sensor ultrasónico que envía una señal de la altura del tanque constantemente a la tarjeta de control y adquisición de datos. La señal se trasmite al computador mediante un puerto serial y es procesada por un control proporcional integral derivativo, la señal regresa a la tarjeta, regula la apertura de la electroválvula proporcional servoaccionada por medio de cuatro resistencias que trabajan de 4 a 20 mA; esto permite que el control del liquido permanezca constantemente en el tanque y se retroalimente con la señal del sensor ultrasónico. Como conclusión, se tiene que el sistema y la simulación son herramientas virtuales que permiten modelar funciones de transferencia que pueden ser visualizadas de forma sencilla en gráficos y tablas de datos; además permite conocer el funcionamiento de instrumentos de control como bombas, sensores, tarjetas de control-adquisición de datos y válvulas generando una idea solida del control automático de procesos.

**PALABRAS CLAVES: /SISTEMA DE CONTROL / CONTROL AUTOMATICO /
SOFTWARE LABVIEW / SIMULACION DEL PROCESO / DESARROLLO E
IMPLEMENTACION DEL SISTEMA / RETROALIMENTACIÓN/**

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A CONTROL SYSTEM FEEDBACK LIQUID LEVEL WITH CONTINUOUS AND VARIABLE

ABSTRACT

We developed and implemented a control system for liquid level with feedback for use in automatic control laboratory as teaching material.

For this purpose, a simulation was performed initially control system using the LabVIEW software. From this information continue with the development of a control system based on proportional integral derivative and the system transfer function. To implement the control system in the tank to use an ultrasonic sensor that sends a constant height of the tank to the control board and data acquisition. The signal is transmitted to the computer through a serial port and is processed by a proportional integral derivative, the signal returns to the card, regulates the opening of the solenoid proportional servo using four resistors working from 4 to 20 mA. This allows control of the liquid remains constant in the tank and fed back to the ultrasonic sensor signal. In conclusion, we have that the system and the simulation is a virtual tool that allows modeling transfer functions can be easily visualized in graphs and tables, can see how control instruments such as pumps, sensors, control cards data-acquisition and valves generating solid idea of automatic process control.

**KEYWORDS: /SYSTEM CONTROL / AUTOMATIC CONTROL / SOFTWARE
LABVIEW / SIMULATION PROCESS / SYSTEM DEVELOPMENT AND
IMPLEMENTATION / FEEDBACK/**

INTRODUCCIÓN

Durante décadas la innovación tecnológica avanza a pasos agigantados desarrollando nuevos sistemas electrónicos eficientes y efectivos, como consecuencia de esto, los procesos industriales sufren evoluciones que permiten innovar y mejorar los sistemas de control en procesos industriales.

La Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador se ha interesado en esta problemática realizando algunos trabajos como es el caso del Sr. Colcha José, Desarrollo de un sistema de laboratorio para el estudio de la dinamica del proceso del nivel de un tanque. Y la Srta. Bautista Blanca, Implementación de un transmisor de caudal para el equipo piloto de laboratorio de control de procesos.

Sin embargo con el acelerado cambio tecnológico actual es necesario para la Facultad de Ingeniería Química seguir implementando sistemas de control de procesos vanguardistas.

En el presente trabajo se desarrollo e implemento un sistema de control de nivel de líquidos retroalimentado para el laboratorio de control automático. Con la ayuda del software labview se simuló el sistema de control obteniendo datos del comportamiento dinámico del proceso. Para la implementación en el equipo se utilizó una tarjeta electrónica de control que recibe una señal de entrada de nivel proveniente del sensor ultrasónico, la señal se envía al computador por medio de una tarjeta de control que la transforma de analógica a digital. La señal digital se regula por un control proporcional integral derivativo, y la función de transferencias programadas en labview, se envía nuevamente a la tarjeta de control donde es transforma de digital a analógica para regular la apertura de la electroválvula proporcional servopiloteada con cuatro resistencias que trabajan de 4 a 20 mA, conservando el nivel deseado en el tanque

La retroalimentación del nivel de líquido en el tanque se realiza por medio del sensor ultrasónico que constantemente envía datos de altura del líquido a la tarjeta de control.

Con este trabajo, se cuenta con un equipo valioso que ayudara en el estudio del control automático, debido a que es una herramienta que permite modelar funciones de transferencia, conocer el funcionamiento de instrumentos de control y simular el sistema de control.

1. CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

1.1 Sistema automático de control

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, sin intervención de agentes exteriores, corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

1.2 Sistemas de control

El control del proceso consistirá en la recepción de unas entradas, variables del proceso, su procesamiento y comparación con unos valores predeterminados por el usuario, y posterior corrección en caso de que se haya producido alguna desviación respecto al valor prestablecido de algún parámetro de proceso. El bucle de control típico estará formado por los siguientes elementos, a los que habrá que añadir el propio proceso.

- ✓ Elementos de medida (Sensores) Generan una señal indicativa de las condiciones de proceso.
- ✓ Elementos de control lógico (Controladores): Leen la señal de medida, comparan la variable medida con la deseada (punto de consigna) para determinar el error, y estabilizan el sistema realizando el ajuste necesario para reducir o eliminar el error.
- ✓ Elementos de actuación (Válvulas y otros elementos finales de control): reciben la señal del controlador y actúan sobre el proceso.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, calculo y corrección, constituyen un ciclo cerrado. El conjunto de elementos que hacen posible este control reciben el nombre de bucle de control (control loop).^[1]

1.3 Estrategias de control

En la industria existen diferentes tipos de control establecidos para procesos específicos que son establecidos sin inconvenientes.

1.3.1 Control por retroalimentación. Katsuhiko Ogata, define el control retroalimentado como una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

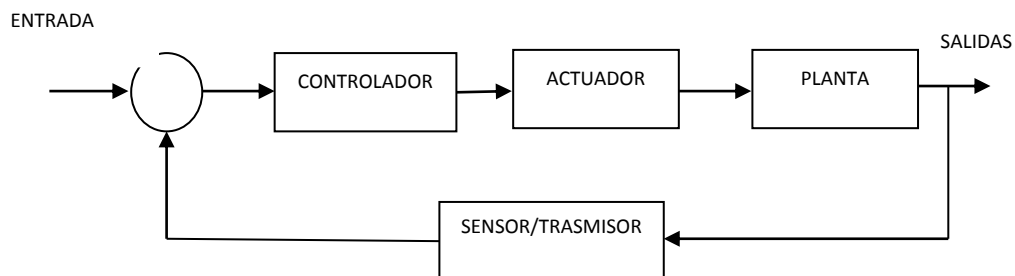


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado

El esquema de la Figura 1 ilustra cada uno de los elementos básicos de un sistema de control retroalimentado. Un análisis simple del papel de cada una de estas entidades, permite establecer un paralelo directo con un sistema típico de administración de mantenimiento.

Para esclarecer la correspondencia entre cada órgano, se describirá cada parte del sistema de control retroalimentado y se establecerá su análogo en el sistema administrativo:

✓ Entradas

Son las señales que van a ser controladas o manipuladas de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Un ejemplo puede ser un sistema de bombeo, en el cual, las entradas pueden ser la presión y el caudal requeridos, los cuales deben controlarse para que estén acordes a las condiciones preestablecidas.

Para un sistema de administración de mantenimiento, las entradas son los requerimientos de la planta, los cuales pueden ser la disponibilidad de los equipos, el nivel de calidad del producto terminado, la tasa de velocidad de producción y hasta los niveles de seguridad asociados a la operación de los equipos. Debido a que ninguna planta es exactamente igual a la otra, la primera tarea del administrador de mantenimiento debe ser la determinación de manera objetiva de los requerimientos de la planta hacia el área de mantenimiento.

✓ Sumador y Controlador

El sumador es un elemento que recibe las entradas y las compara con las salidas reales del sistema, captadas por el sensor. Esta diferencia es conocida como error, y es recibido por el controlador, quien actúa sobre ella dependiendo de sus características de diseño. El homólogo del conjunto sumador controlador en el sistema de gestión de activos es el área administrativa. El administrador de mantenimiento es quien tiene la responsabilidad de tomar decisiones respecto a las incongruencias encontradas entre los requerimientos y los resultados.

Las decisiones deben enmarcadas en el contexto institucional del área, como son sus limitaciones, capacidades, políticas y objetivos establecidos por la alta dirección para la compañía.

✓ Actuador

Como su nombre lo indica, el actuador es el que desarrolla las acciones ordenadas por el controlador. En un sistema común, estas acciones pueden ser cerrar una válvula, encender un interruptor etc. En el caso de la administración de mantenimiento, el actuador corresponde al personal operativo del área.

✓ Planta

La planta es el sistema que se ve sometido a las acciones operativas, la cual a su vez emite señales conocidas como salidas.

Cuando se habla de una planta de producción, ya sea de bienes o servicios, se habla de un complejo conjunto de sistemas, en el cual interactúan recursos, tiempo y personas. Cuando la función de mantenimiento ejerce acciones dentro de la planta, esta responde con señales acordes a las actividades previamente ejecutadas.

Estas señales revelan de manera directa o indirecta la efectividad de la gestión de mantenimiento.

✓ Sensor

El sensor es el elemento que tiene como propósito medir y procesar las salidas de la planta, de tal manera que puedan ser comparadas por parte del sumador y entonces, dependiendo de la diferencia entre lo real y lo esperado, el controlador pueda desarrollar la acción respectiva. Para un sistema de administración y control de mantenimiento, el sensor más que un elemento físico, es una metodología que pretende retroalimentar el sistema con la información que se genera en el día a día.

[2]

1.4 Control pid (proporcional integral derivativo)

Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso.

El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional determina la reacción del error actual.

El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador.

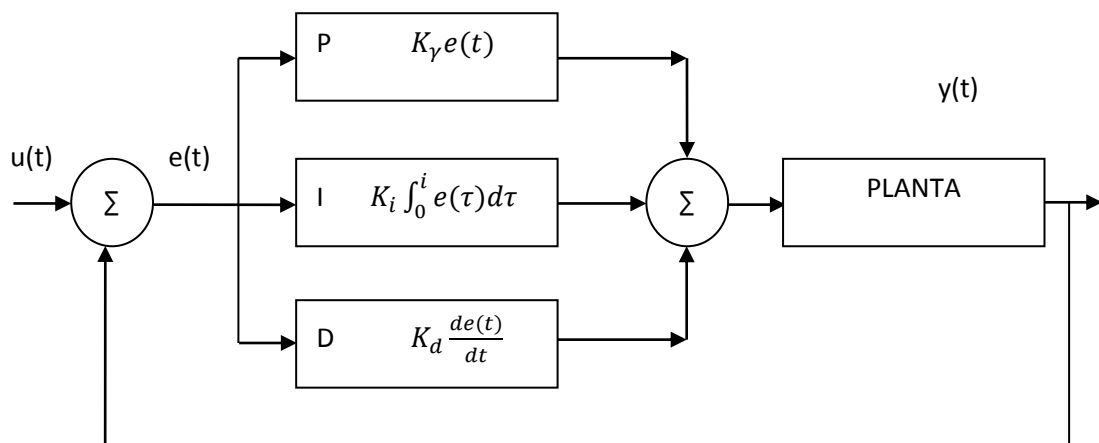


Figura 2. Diagrama en bloques de un control PID.

1.4.1 Acción Proporcional. La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango.

La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

El error, la banda proporcional y la posición inicial del elemento final de control se expresan en tanto por uno. Nos indicará la posición que pasará a ocupar el elemento final de control.

1.4.2 Acción Integral. El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional.

El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; Luego es multiplicado por una constante I. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional.

1.4.3 Acción Derivativa. La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna, o "Set Point".

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante D y luego se suma a las señales anteriores (P+I). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordemente. El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso.

Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva.^[3]

1.5 Instrumentos de control

1.5.1 *Electroválvula proporcional servoaccionada de 2 vías.* Este tipo de válvulas es controlada variando la corriente que circula a través de un solenoide (conductor ubicado alrededor de un émbolo, en forma de bobina). Esta corriente, al circular por el solenoide, genera un campo magnético que atrae un émbolo móvil.

La regulación proporcional de la apertura y cierre de la válvula se alcanza mediante la regulación progresiva de la corriente de la bobina y de la fuerza de conexión de la bobina.

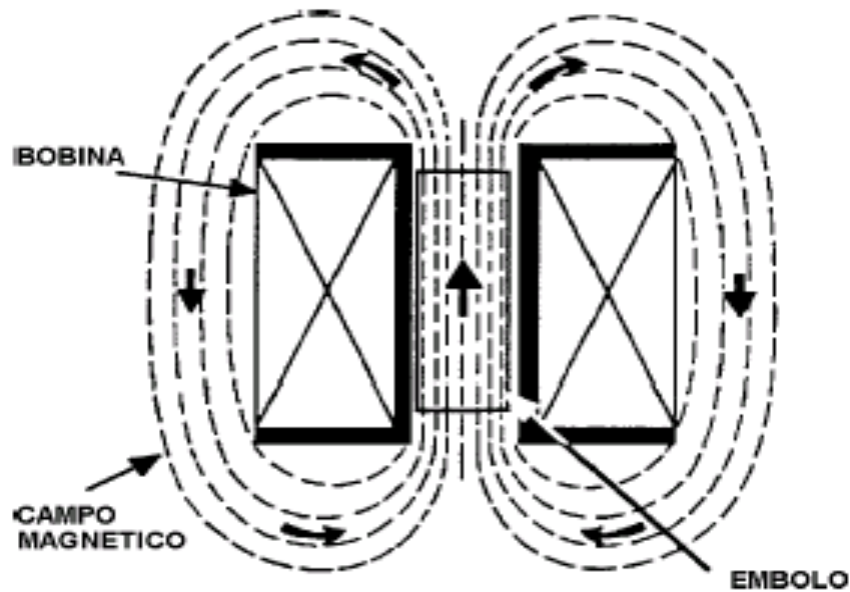


Figura 3. Campo producido por una bobina.

1.5.1.1 Funcionamiento de la electroválvula. Cuando aumenta la corriente de la bobina, la fuerza de conexión de ésta excederá en un punto concreto la fuerza equivalente del muelle de cierre.

La armadura se mueve verticalmente, abriendo el orificio piloto del diafragma, el cual debido al efecto servo sigue el movimiento de la armadura.

La válvula se abre completamente cuando la corriente de la bobina alcanza su valor máximo. Mediante la regulación progresiva de la corriente de la bobina, la armadura se puede colocar en cualquier posición en el tubo de la armadura y ajustar la válvula a cualquier posición entre completamente cerrada y completamente abierta.

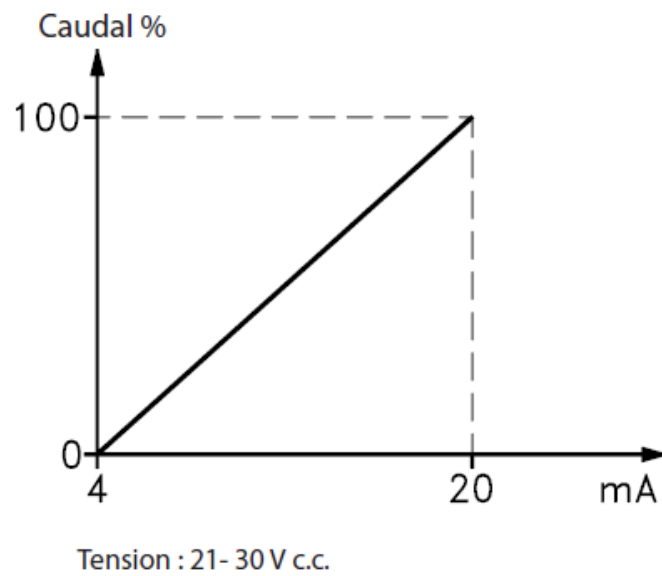


Figura 4. Tensión - caudal de una electroválvula

1.5.1.2 Partes de una electroválvula

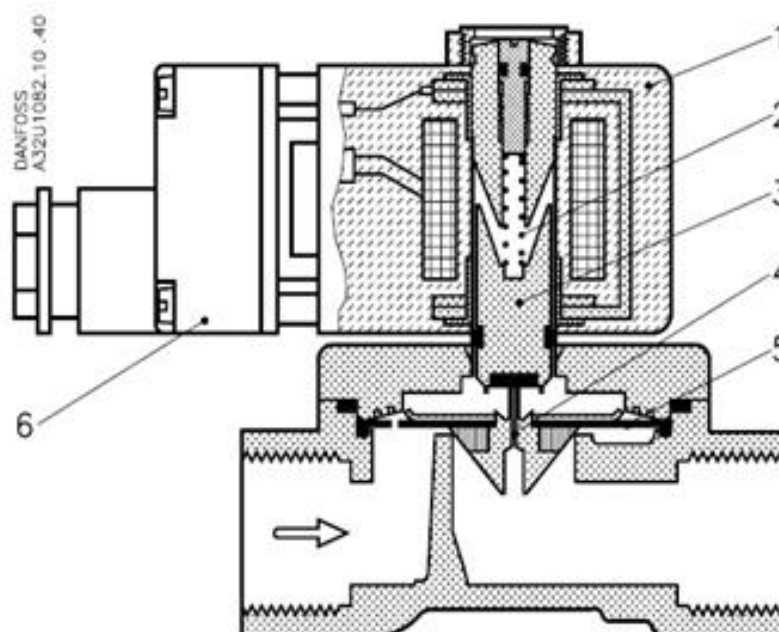


Figura 5. Electroválvula proporcional servoaccionada de 2 vías

Cuadro 1. Piezas de una electroválvula

Ref.	Nombre de la pieza
1	Bobina
2	Muelle de cierre
3	Armadura
4	Orificio piloto
5	Diafragma
6	Caja de terminales

✓ Bobina

Son componentes pasivos de dos terminales que generan un flujo magnético cuando se hacen circular por ellas una corriente eléctrica. Se fabrican arrollando un hilo conductor sobre un núcleo de material ferromagnético o al aire.

✓ Muelle de cierre

El cierre de las válvulas se encomienda a la acción de un muelle, cuya tensión debe ser suficientemente alta para cerrar la válvula rápidamente, aún en los altos regímenes y, al mismo tiempo, lo mas baja posible para no dificultar en exceso la apertura de la válvula. Se construyen generalmente en acero aleado con silicio-magnesio.

✓ Armadura

Es la parte móvil que se encarga de desplazar los contactos principales y auxiliares por la excitación de la bobina.

Los sistemas de armadura en las válvulas solenoides están hechos de un material magnético que permite a la válvula abrir y cerrar fácilmente. Pero los materiales magnéticos son suaves y menos durables que los de acero inoxidable no magnéticos con el tiempo esto se traduce en que los sistemas de armadura pueden ser dañados por medios agresivos y sucios. Los medios agresivos causan rápida corrosión en la armadura y las impurezas de un medio sucio pueden bloquear el movimiento de abrir y cerrar.

✓ Orificio piloto

Es una abertura pequeña en el paso del flujo de líquido. El flujo que pasa por un orificio se ve afectado por diferentes factores. Tres de los factores más comunes son:

1. La temperatura del aceite.
2. El tamaño del orificio.
3. La presión diferencial a través del orificio

✓ Membrana

Membrana de un material flexible y fino con forma de disco que se coloca en la apertura del orificio piloto para impedir corrosión en la armadura. Membrana de separación entre dos cavidades de una máquina.

✓ Caja de terminales

Es una caja eléctrica que se utiliza para ejecutar varios conductores en dos o más direcciones para llevar la energía a diferentes dispositivos eléctricos y se instala de modo que siempre esté accesible. Debido a que las cajas eléctricas cuadradas maximizan el volumen de pulgada cúbica, la mayoría de las cajas de conexión son cuadradas ^[4]

1.5.2 Sensor Ultrasónico



Figura 6. Sensor ultrasónico

1.5.2.1 Funcionamiento del sensor ultrasónico. El ultrasonido es sonido exactamente igual al que escucha el ser humano normalmente, pero con una frecuencia mayor a la máxima audible por el oído humano.

Esta comienza desde unos 16 KHz y tiene un límite superior de aproximadamente 20 KHz, mientras que se va a utilizar sonido con una frecuencia de 40 KHz. A este tipo de sonidos es a lo que se denomina Ultrasonidos.

El funcionamiento básico de los sensores ultrasónicos como medidores de distancia tienen un receptor que emite un pulso de ultrasonido, el cual rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos.

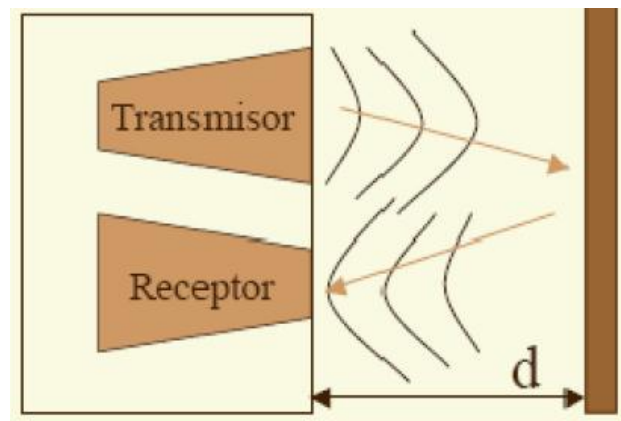


Figura 7. Principio de funcionamiento de los sensores ultrasónicos

La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica.

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora.

A pesar de que su funcionamiento parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas.

Por tanto, es necesario un conocimiento de las diversas fuentes de incertidumbre que afectan a las medidas para poder tratarlas de forma adecuada, minimizando su efecto en el conocimiento del entorno que se desea adquirir. Entre los diversos factores que alteran las lecturas que se realizan con los sensores de ultrasonido cabe destacar:

El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo.

Aunque la opción de que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono acústico, la posibilidad que el eco se haya producido por un objeto presente en la periferia del eje central no es en absoluto despreciable y ha de ser tomada en cuenta y tratada convenientemente.

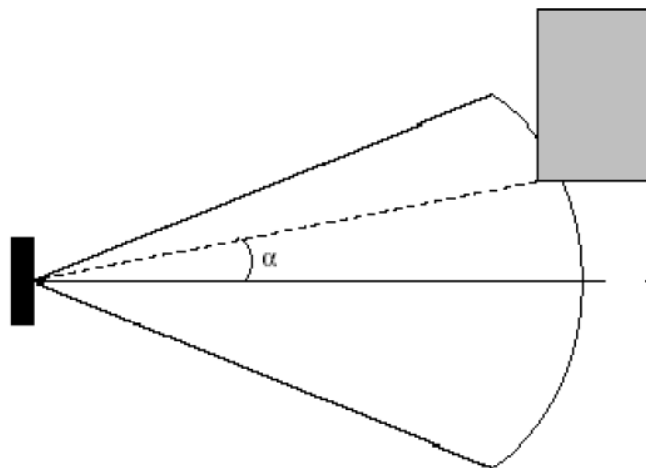


Figura 8. Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido

1.5.2.2 Margen de detección de un sensor de ultrasonido. La cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie reflectora debe ser comparable a la longitud de onda de la onda de ultrasonido incidente.

En los sensores de ultrasónicos de bajo coste se utiliza el mismo transductor como emisor y receptor.

Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo.

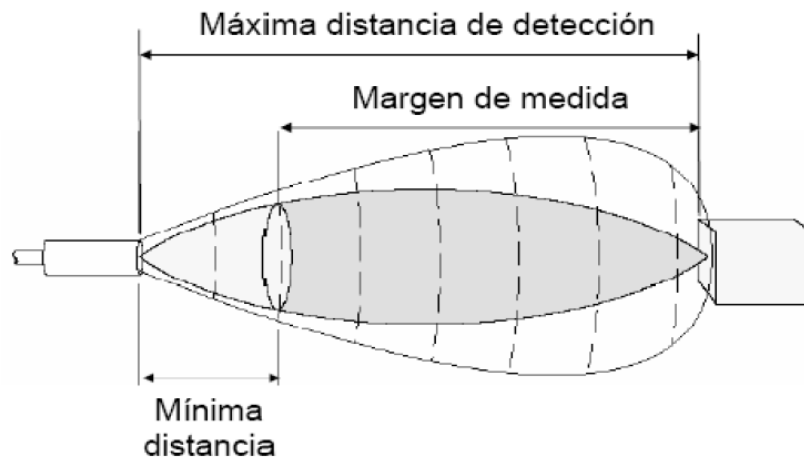


Figura 9. Márgenes de detección de un sensor de ultrasonido

1.5.2.3 Reflexión de la señal. Las ondas de ultrasonido obedecen a las leyes de reflexión de las ondas, por lo que una onda de ultrasonido tiene el mismo ángulo de incidencia y reflexión respecto a la normal a la superficie. Esto implica que si la orientación relativa de la superficie reflectora con respecto al eje del sensor de ultrasonido es mayor que un cierto umbral.^[5]

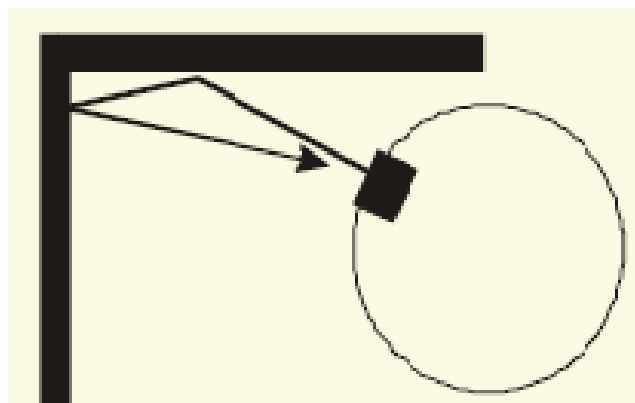


Figura 10. Reflexión de la señal

1.5.3 Bomba centrífuga. Las bombas centrífugas, también denominadas rotativas, tienen un rotor de paletas giratorio sumergido en el líquido. El líquido entra en la bomba cerca del eje del rotor, y las paletas lo arrastran hacia sus extremos a alta presión. El rotor también proporciona al líquido una velocidad relativamente alta que puede transformarse en presión en una parte estacionaria de la bomba, conocida como difusor.

La disposición del eje de giro presupone que la bomba y el motor se hallan a la misma altura; éste tipo de bombas se utiliza para funcionamiento en seco, exterior al líquido bombeado que llega a la bomba por medio de una tubería de aspiración.

Las bombas centrífugas, sin embargo, no deben rodar en seco, ya que necesitan del líquido bombeado como lubricante entre aros rasantes e impulsor, y entre empaquetadura y eje.

Como no son auto aspirantes requieren, antes de su puesta en marcha, el estar cebadas; esto no es fácil de conseguir si la bomba no trabaja en carga, estando por encima del nivel del líquido, que es el caso más corriente con bombas horizontales, siendo a menudo necesarias las válvulas de pie, (aspiración), y los distintos sistemas de cebado.

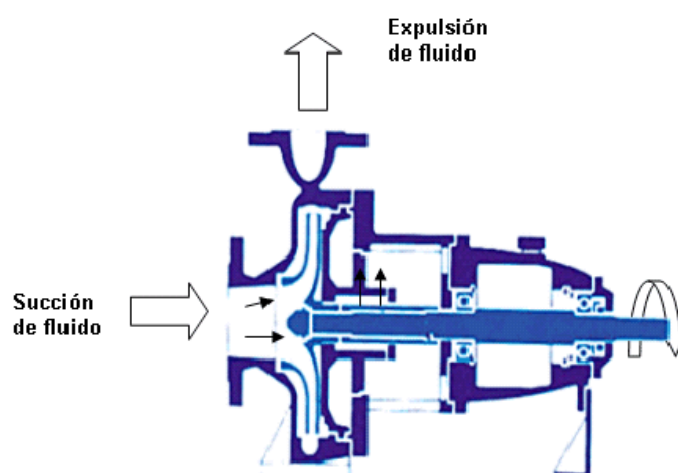


Figura 11. Succión y expulsión de fluido en una bomba centrífuga

1.5.3.1 Funcionamiento de una bomba centrífuga. Las bombas centrífugas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; son pues, máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

Los elementos de que consta una instalación son:

✓ El impulsor o rodete

Formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba.

Los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

✓ La voluta

Es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

✓ Tubería de impulsión

Instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

Los componentes de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes.

La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

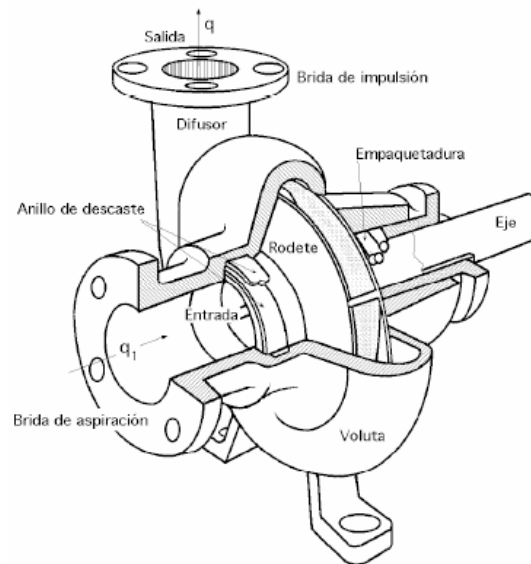


Figura 12. Bomba Centrífuga, disposición, esquema y perspectiva

1.5.3.2 Partes de una bomba centrífuga

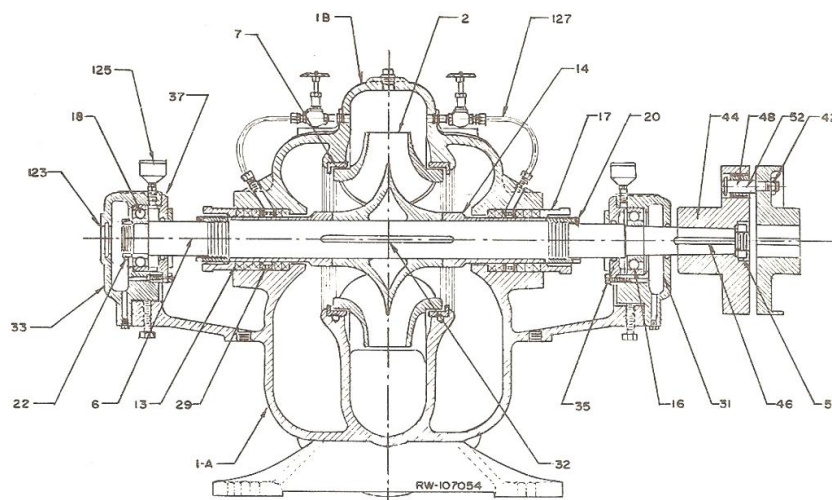


Figura 13. Partes constitutivas de una bomba centrífuga

Cuadro 2. Partes constitutivas de una bomba centrífuga

Nomenclatura recomendada para piezas de las bombas Centrífugas.			
Ref. No.	Nombre de la pieza	Ref. No.	Nombre de la pieza
1	Carcasa	31	Cubierta de cojinete (interno)
1A	Carcasa (mitad inferior)	32	Cuña del impulsor
1B	Carcasa (mitad superior)	33	Cubierta de cojinete (externo)
2	Impulsor	35	Tapa de cojinete (interno)
6	Árbol de la bomba	37	Tapa de cojinete (externo)
7	Anillo de la carcasa	42	Acoplamiento (mitad en el impulsor)
13	Empaquetadura	44	Acoplamiento (mitad en la bomba)
14	Manguito del árbol	46	Cuña del acoplamiento
16	Cojinete (interno)	48	Buje del acoplamiento
17	Collarín del estopero	50	Contratuerca del acoplamiento
18	Cojinete (externo)	52	Pasador del acoplamiento
20	Tuerca de manguito de árbol.	123	Tapa de extremo de cojinete
22	Contratuerca del cojinete	125	Aceitera o grasera
29	Anillo de cierre hidráulico	127	Tubo de sello

Las bombas centrífugas clasifican, de acuerdo con la ubicación de la tobera de succión, como 1) succión por el extremo. 2) succión lateral, 3) succión inferior y 4) succión superior.

1.5.3.3 Descripción de piezas de una bomba centrífuga

✓ Carcasa

La función de la carcasa en una bomba centrífuga es convertir la energía de velocidad impartida al líquido por el impulsor en energía de presión. Esto se lleva a cabo mediante reducción de la velocidad por un aumento gradual del área.

✓ Impulsores

El impulsor es el corazón de la bomba centrífuga. Recibe el líquido y le imparte una velocidad de la cual depende la carga producida por la bomba.

Muchos impulsores se diseñan para aplicaciones específicas. Para aguas negras, que suelen contener trapos y materiales fibrosos, se utilizan impulsores especiales que no se atascan, con aristas redondeadas y amplios conductos para agua.

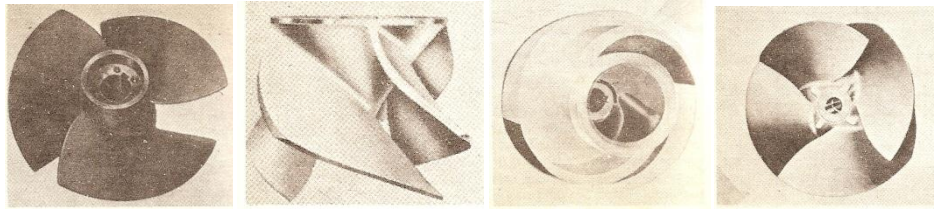


Figura 14. Tipos de impulsores

✓ Flechas

La flecha de una bomba centrífuga es el eje de todos los elementos que giran en ella, transmitiendo además el movimiento que le imparte la flecha del motor.

En el caso de una bomba centrífuga, la flecha es una sola pieza o lo largo de toda la bomba. En el caso de bombas de pozo profundo, existe una flecha de impulsores y después una serie de flechas de transmisión unidas por un cuple, que completan la longitud necesaria desde el cuerpo de tazones hasta el cabezal de descarga.

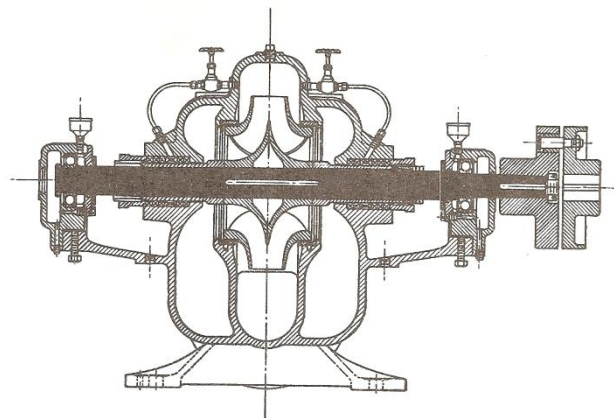


Figura 15. Flecha de una bomba centrífuga

✓ Cojinetes

El objeto de los cojinetes es soportar la flecha de todo el rotor en un alineamiento correcto en relación con las partes estacionarias. Por medio de un correcto diseño soportan las cargas radiales y axiales existentes en la bomba.

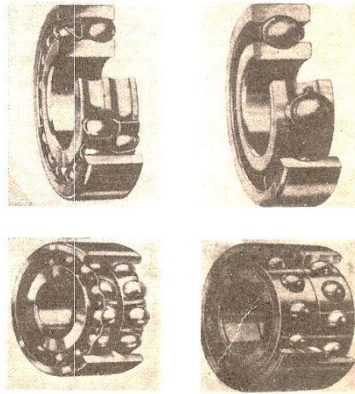


Figura 16. Diferentes tipos de baleros o rodamientos

✓ Anillos de desgaste

Los anillos desgastables proporcionan un sello contra fugas (que es fácil y rápido de sustituir), entre el impulsor y la carcasa. Un sello que no tiene piezas sustituibles se utiliza sólo en bombas muy pequeñas y poco costosas.

El anillo estacionario se llama 1) anillo de carcasa si está montado en ésta; 2) anillo de tapa de succión o anillo de cabeza de succión si está montado en la tapa o en la cabeza; y 3) anillo de tapa de prensaestopas (estopero), si está montado en esa tapa.

Hay una pieza renovable, se llama anillo del impulsor, para la superficie de desgaste del impulsor. Las bombas que tienen anillos estacionarios y rotatorios se lo llama de construcción de doble anillo.

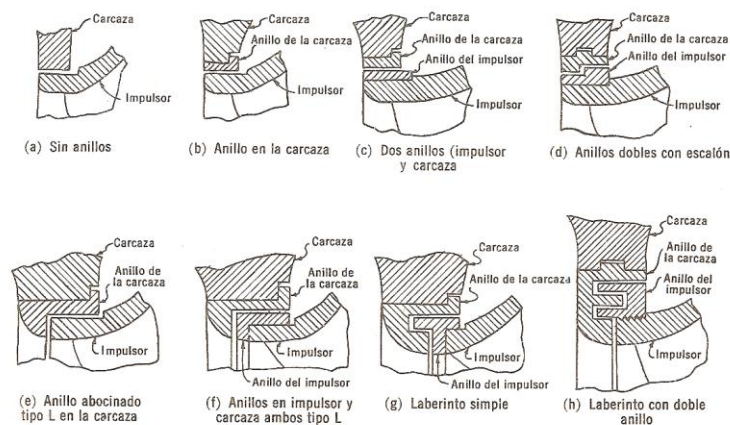


Figura 17. Diferentes tipos de anillos de desgaste

✓ Árboles y manguitos de los árboles.

Los diámetros de los árboles de las bombas suelen ser mayores de lo que se necesita para transmitir el par motor, debido a que su tamaño se determina por la deflexión máxima permisible o deseable del árbol. Esta deflexión se selecciona para evitar un posible contacto en las superficies de desgaste a la vez que se mantienen holguras razonables que no afecten muy perjudicialmente la eficiencia de la bomba.

✓ Prensaestopas (estoperos)

Los prensaestopas tienen la función principal de proteger la bomba contra fugas en el punto en que el árbol sale de la carcasa de la bomba.

Si la bomba produce altura de aspiración y la presión en el extremo de prensaestopas interior es menor que la atmosférica, entonces la función del prensaestopas es evitar las filtraciones de aire a la bomba. Si esta presión es mayor que la atmosférica, la función es evitar las fugas hacia afuera de la bomba.

✓ Acoplamientos

Las bombas centrífugas están conectadas a sus impulsores por medio de acoplamientos (coples) de diversos tipos, excepto en las bombas con acoplamiento cerrado, en las cuales el impulsor está montado en una extensión del árbol de la máquina motriz. Los acoplamientos utilizados con las bombas centrífugas pueden ser rígidos (del tipo de abrazadera o compresor) o flexibles (de pasador y tope, de engranes, de rejilla, o de disco flexible). ^[6]

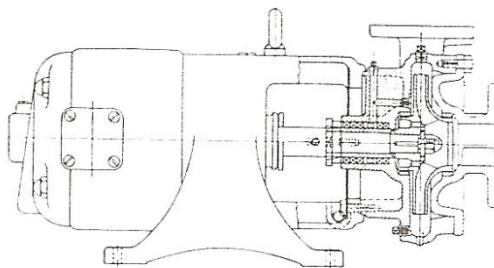


Figura 18. Bomba con acoplamiento compacto (montada en el motor)

1.5.4 Tarjeta de control

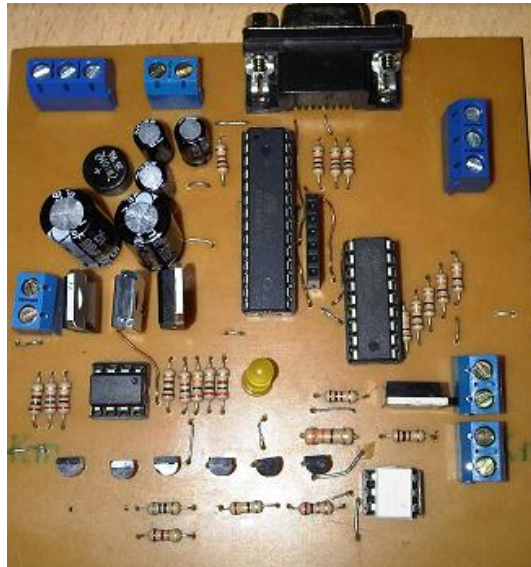


Figura 19. Tarjeta de control

1.5.4.1 Adquisición de señales. La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

1.5.4.2 Proceso de señales. La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico o la propiedad física de un objeto (objeto de la investigación) que se desea medir.

Esta propiedad física o fenómeno podría ser el cambio de temperatura o la temperatura de una habitación, la intensidad o intensidad del cambio de una fuente de luz, la presión dentro de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto.

Un eficaz sistema de adquisición de datos puede medir todas estas diferentes propiedades o fenómenos.

Un sensor es un dispositivo que convierte una propiedad física o fenómeno en una señal eléctrica correspondiente medible, tal como tensión, corriente, el cambio en los valores de resistencia o condensador, etc. La capacidad de un sistema de adquisición de datos para medir los distintos fenómenos depende de los transductores para convertir las señales de los fenómenos físicos mensurables en la adquisición de datos por hardware. Transductores son sinónimo de sensores en sistemas de DAQ.

Hay transductores específicos para diferentes aplicaciones, como la medición de la temperatura, la presión, o flujo de fluidos. DAQ también despliega diversas técnicas de acondicionamiento de Señales para modificar adecuadamente diferentes señales eléctricas en tensión, que luego pueden ser digitalizadas.

Las señales pueden ser digitales o analógicas en función del transductor utilizado. El acondicionamiento de señales suele ser necesario si la señal desde el transductor no es adecuado para la DAQ hardware que se utiliza.

La señal puede ser amplificada o desamplificada, o puede requerir de filtrado, o un cierre patronal, en el amplificador se incluye para realizar demodulación.

DAQ hardware son por lo general las interfaces entre la señal y un PC. Podría ser en forma de módulos que pueden ser conectados a la computadora de los puertos (paralelo, serie, USB, etc...) o ranuras de las tarjetas conectadas a (PCI) en la placa madre.^[7]

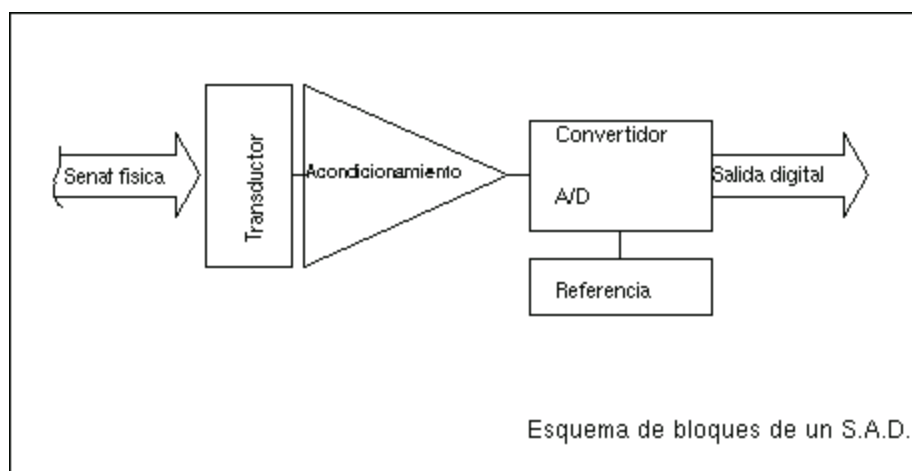


Figura 20. Proceso S.A.D

2. SOFTWARE DE CONTROL LABVIEW

El Labview es un lenguaje de programación de alto nivel, de tipo gráfico, y enfocado al uso en instrumentación.

Pero como lenguaje de programación, debido a que cuenta con todas las estructuras, puede ser usado para elaborar cualquier algoritmo que se desee, en cualquier aplicación, como en análisis, telemática, control automático, juegos, manejo de textos, etc.

2.1 Panel frontal

Es donde están ubicados todos los indicadores y controles que el usuario podrá ver cuando el programa este en funcionamiento. Por ejemplo botones, perillas, gráficas, etc.

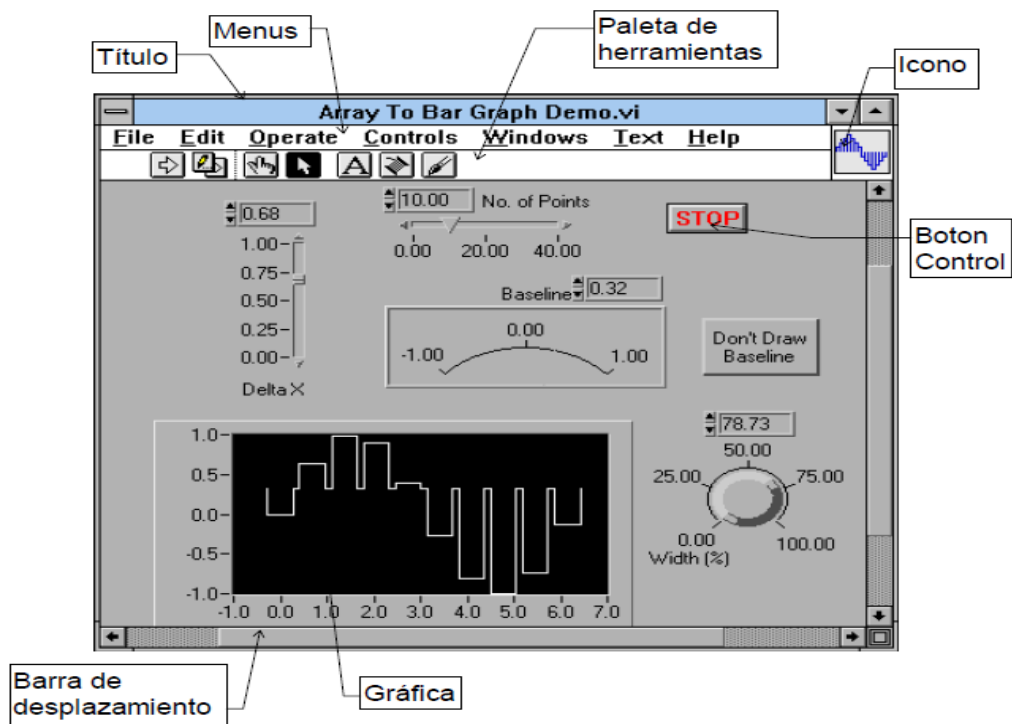


Figura 21. Panel frontal de labview

2.2 Diagrama de bloques

Muestra el programa en código gráfico G, el cual es el objetivo de aprendizaje en un nivel básico, en este libro. Se usan en este diagrama estructuras de programación, y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas, a través de líneas.

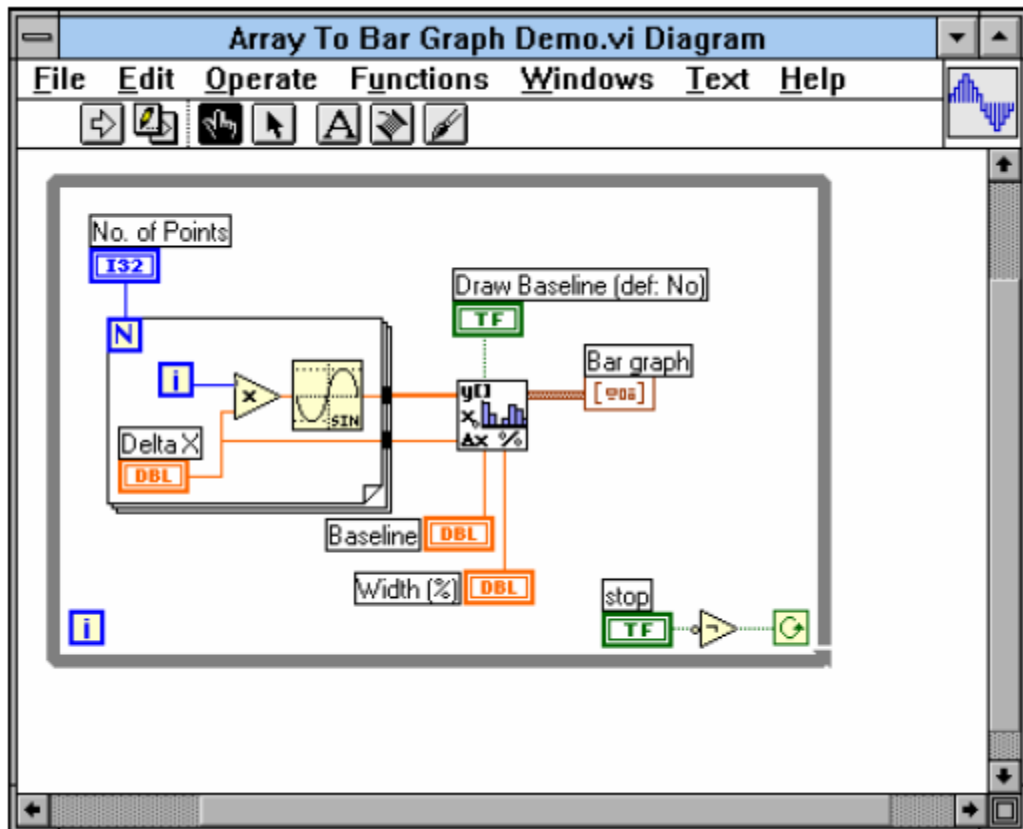


Figura 22. Diagrama de bloques de labview

2.3 Paletas de trabajo

Tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques, existe una paleta de herramientas, que sirve tanto para editar el VI, o ejecutarlo según el modo de trabajo que se tenga.

Cuando se trabaja en modo de ejecución la paleta es la de la figura 23.

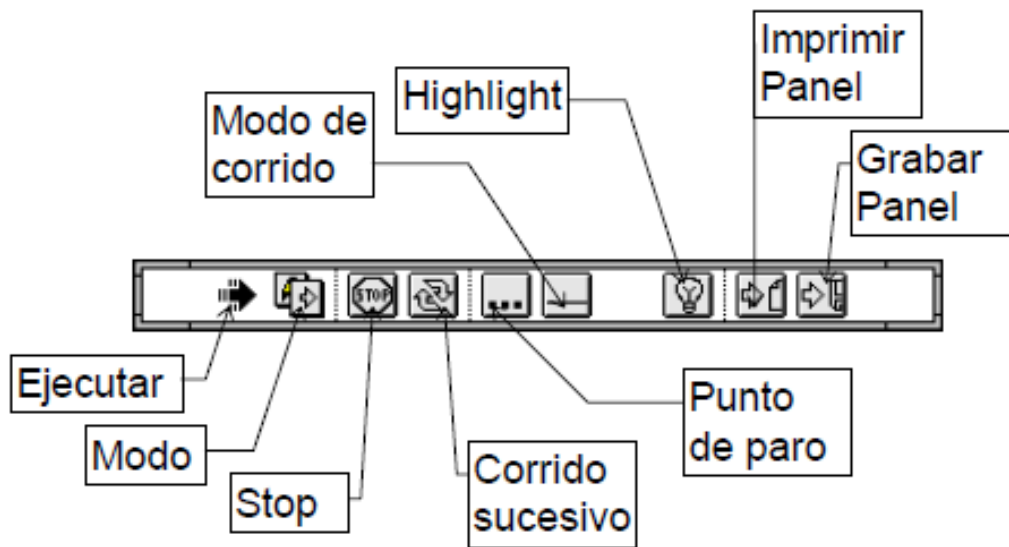


Figura 23. Paleta de trabajo en modo de ejecución

En el modo de edición la paleta es la siguiente.

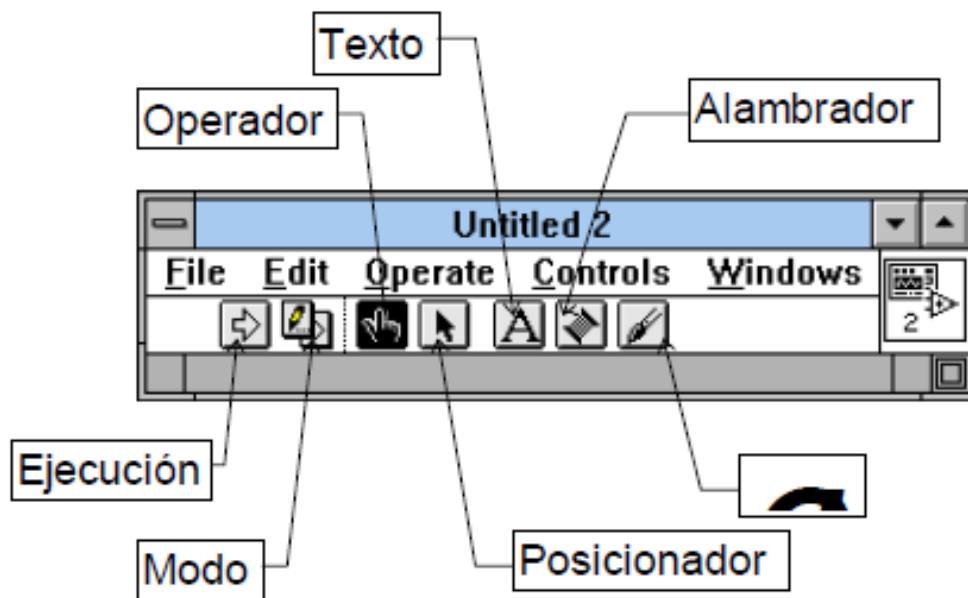


Figura 24. Paleta de trabajo en modo de ejecución

2.4 Desarrollo de una VI (Virtual Instruments)

Al desarrollar una aplicación o una subrutina primero se debe tener un claro conocimiento de que valores se van a utilizar, cuales van a ser las entradas y cuales las salidas, para así definir como se van a entrar y sacar estos valores.

Por ejemplo si simplemente se desea realizar un programa que tome dos números y entregue como resultado la suma de estos hasta que se pulse un botón de stop, al final diga que terminó, se sabe que debe haber un instrumento de control para la entrada de cada valor, y un indicador que muestre el resultado.

Para crear lo anterior se logra simplemente ubicándose en el panel frontal y sacando dos controles y un indicador del menú Controls. Esto se hace uno a uno, y se debe ir nombrando cada elemento en el label, a medida que se van posicionando. ^[8]

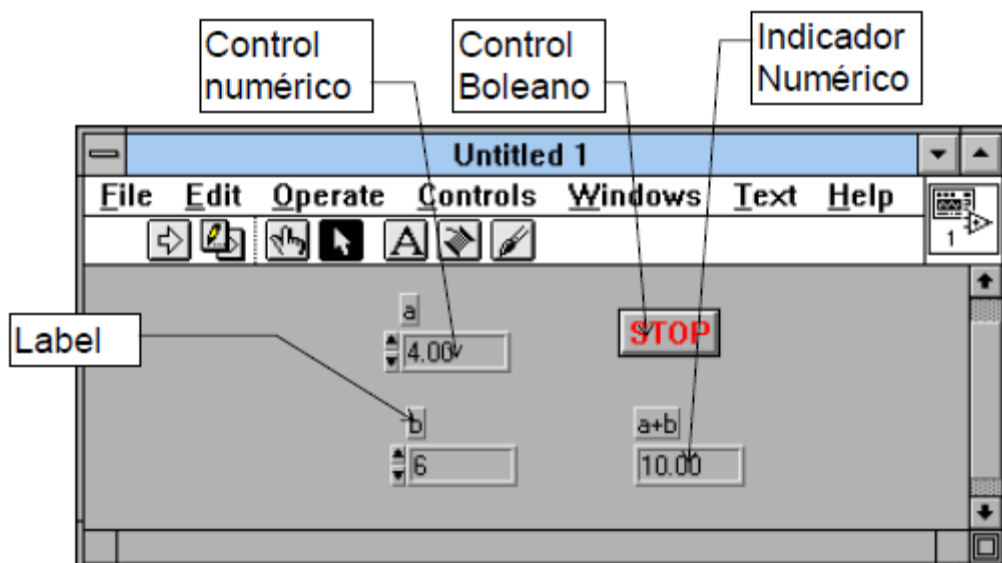


Figura 25. Panel frontal de la VI

Se aprecia como en estos instrumentos digitales se diferencian los controles del indicador porque estos cuentan con unas flechas para manipularlos cuando el programa está corriendo. También se pueden cambiar escribiendo sobre ellos.

Estos controles se pueden configurar sacando el Pop-menú de cada uno, señalándolo y oprimiendo el botón derecho del mouse, así si por ejemplo se comete un error al nombrar el instrumento y no se alcanza a escribir el nombre, en este menú en la subsección show, label, se puede hacer que reaparezca la marca para así escribir sobre ella.

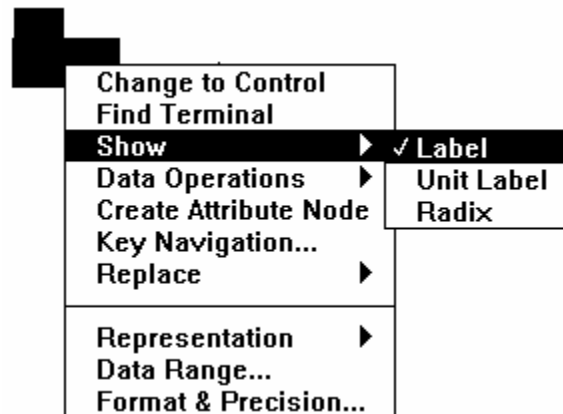


Figura 26. Pop-menú de labview

El diagrama de flujo de la VI se compone de cinco tipos de elementos:

- ✓ Las terminales de conexión de los indicadores y de los controles del panel frontal.
- ✓ Se nota que las líneas del dibujo de la conexión de los controles es más gruesa que la de los indicadores, para diferenciarlos.
- ✓ Las constantes.
- ✓ Las funciones y cajas negras, donde se procesan las señales.
- ✓ Las estructuras de programación.
- ✓ Los cables que conducen las diferentes señales, los cuales varían según la señal que conducen.

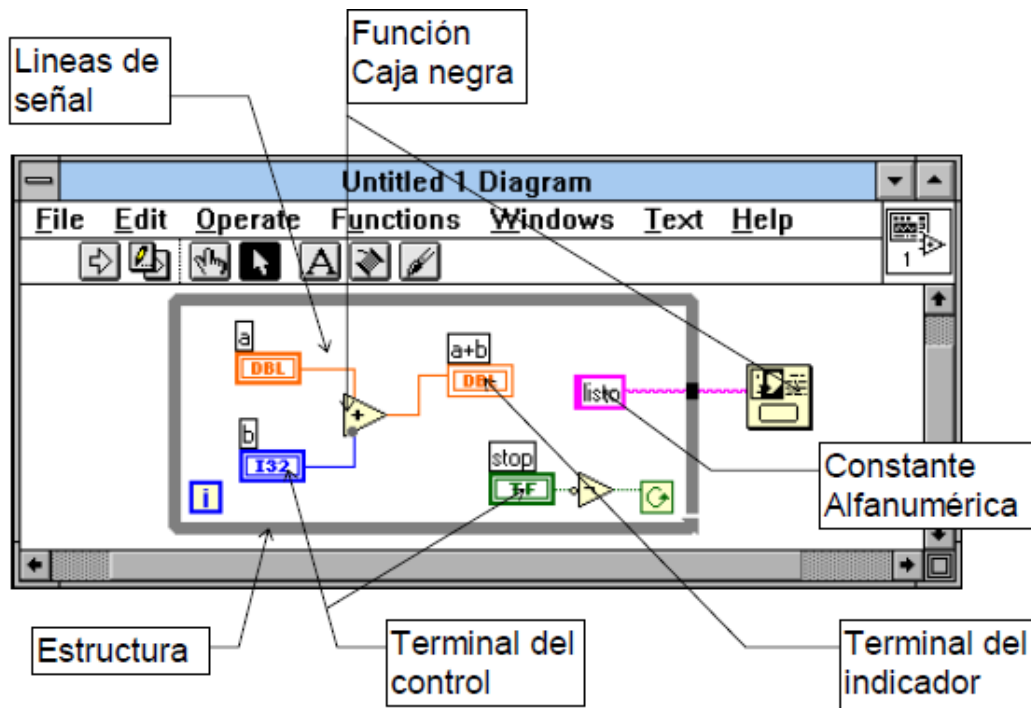


Figura 27. Diagrama de bloques de la VI

Para realizar el diagrama de bloques se buscan las estructuras necesarias en el menú de funciones, estructuras y constantes, donde se encuentra el ciclo mientras (While). Posteriormente se ubican las funciones necesarias en el menú de Funciones, como en este caso el sumador y el negador en el submenú arithmetic, y el cuadro de diálogo en el submenú Time & Dialog.

Los terminales aparecen automáticamente en el diagrama de bloques al armar el panel frontal. Por último se hacen las conexiones con ayuda de la herramienta de alambrado

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1 Desarrollo del modelo matemático

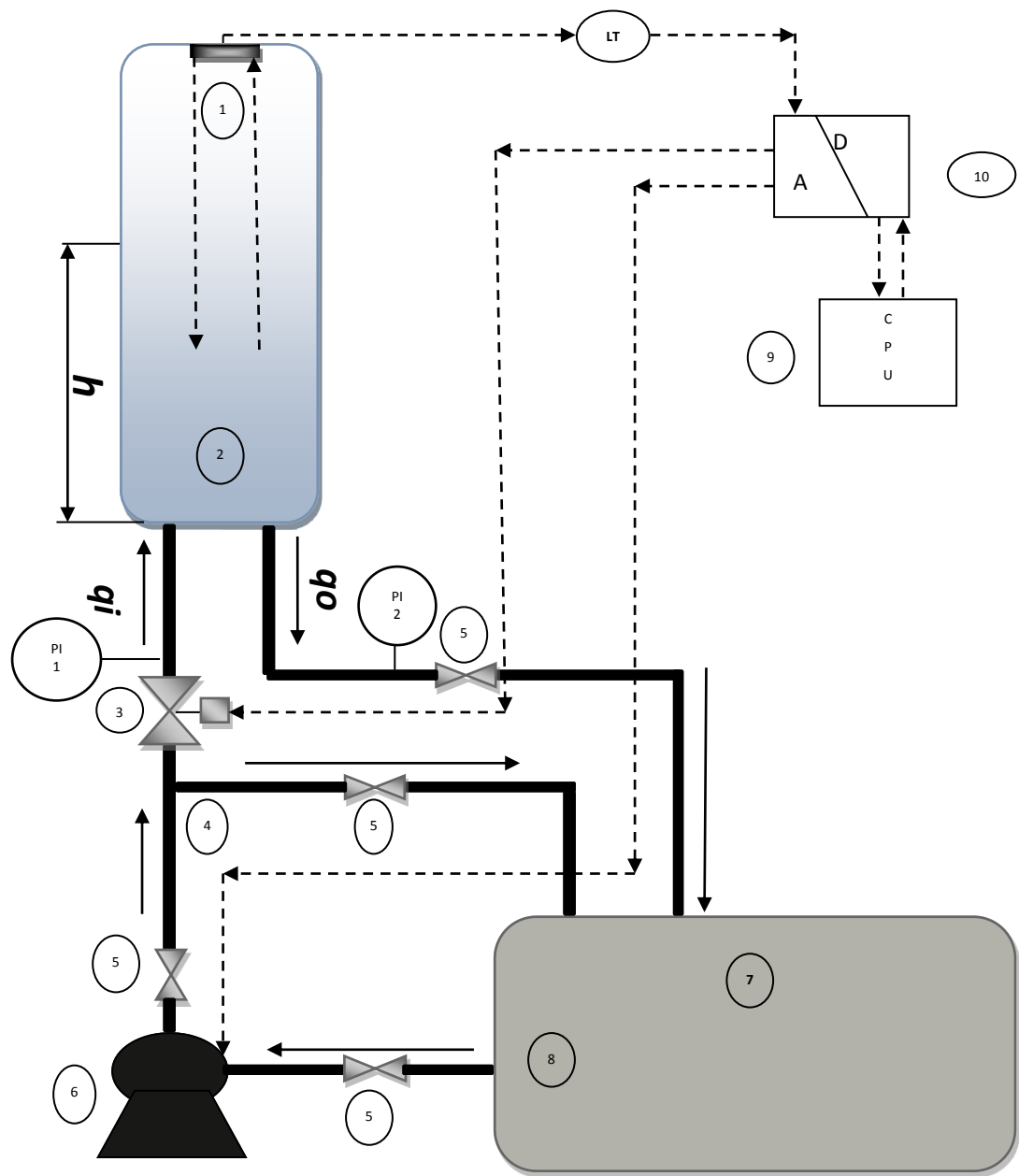


Figura 28. Sistema de Control

A continuación se realiza el análisis del sistema por lo que se toma en cuenta los siguientes puntos:

La apertura de la válvula no permanece constante debido a que la válvula es responsable de manipular el caudal q a la entrada responsable de la altura del tanque por lo que el flujo pasa a través de la válvula esta dado por:

$$q_{(t)} = K_V \sqrt{\Delta P_{(t)}} \quad (1)$$

Donde:

ΔP = Presion sobre el liquido, psi

K_V = constante de la valvula, $\frac{m^3}{min * psi^{\frac{1}{2}}}$

$q_{(t)}$ =Caudal en función del tiempo, m^3

Para este proceso tenemos

$$\Delta P = P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2 \quad (2)$$

Donde:

ΔP = Presion sobre el liquido, psi

δ = Densidad del líquido, $\frac{Kg}{m^3}$

g =Gravedad del líquido, $\frac{m}{s^2}$

h =Altura del líquido, m

P_{atm} =Presión atmosférica, psi

Después de tomar en cuenta estas consideraciones, se procede al planteamiento del balance de masa de estado dinámico para el tanque

$$\delta q_i(t) - \delta q_o(t) = A \delta \frac{dh(t)}{dt} \quad (3)$$

1 ecuación, 2 incógnitas ($q_1(t), h_1(t)$)

$$q_{0(t)} = K_V \sqrt{P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2} \quad (4)$$

2 ecuaciones 2 incógnitas

Ahora se realiza el balance de masa de estado dinámico para el tanque:

$$\delta q_i(t) - \delta q_o(t) = A \delta \frac{dh(t)}{dt} \quad (5)$$

Sustituimos la ecuación (4) en (5) y dividimos para δ obteniendo

$$q_i(t) - K_V \sqrt{P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2} = A \frac{dh(t)}{dt} \quad (6)$$

La ecuación (6) se linealiza por medio de series de Taylor

Aplicando la aproximación lineal ha $q_{o(t)}$ tenemos:

$$q_{o(t)} = \bar{q}_0 + \left. \frac{\partial q_o}{\partial h} \right| (h(t) - \bar{h})$$

$$q_{o(t)} = \bar{q}_0 + \frac{\partial}{\partial h} \left[K_V \sqrt{P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2} \right] (h(t) - \bar{h})$$

Obtenemos las derivadas parciales:

$$q_{o(t)} = \bar{q}_0 + \delta g \bar{h} (P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2)^{\frac{1}{2}} (h(t) - \bar{h})$$

Para simplificar la notación se introduce la variable

$$C_1 = \delta g \bar{h} (P_{atm} + \delta g h_{(t)} - P_2)^{\frac{1}{2}}$$

De manera que:

$$q_{o(t)} = \bar{q}_0 + C_1 (h(t) - \bar{h})$$

Ahora sustituimos en la ecuación 6

$$(q_i(t) - \bar{q}_0) + C_1 (h(t) - \bar{h}) = A \frac{dh(t)}{dt}$$

$$(q_i(t) - \bar{q}_0) + C_1(h(t) - \bar{h}) = A \frac{d(h_1(t) - \bar{h}_1)}{dt}$$

Definimos las siguientes variables de desviación:

$$Q_i(t) = q_i(t) - \bar{q}_1$$

$$H(t) = h(t) - \bar{h}$$

Sustituimos estas variables de desviación y obtenemos nuestra ecuación linealizada

$$Q_i(t) + C_1 H(t) = A \frac{dH(t)}{dt} \quad (7)$$

Reordenando la ecuación y dividiendo para C_1 , obteniendo

$$A \frac{dH(t)}{dt} + C_1 H(t) = Q_i(t)$$

$$\frac{A}{C_1} \frac{dH(t)}{dt} + H(t) = \frac{1}{C_1} Q_i(t) \quad (8)$$

Donde:

τ_p = Constante de tiempo del proceso

K_p = Ganancia del proceso

$$\tau_p = \frac{A}{C_1} \quad (9)$$

$$K_p = \frac{1}{C_1} \quad (10)$$

Quedando la ecuación de la siguiente forma

$$\tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) = K_p Q_i(t) \quad (11)$$

Aplicando la transformada de Laplace de la ecuación

$$H(s) = \frac{K_P}{\tau s + 1} Q_i(t) \quad (12)$$

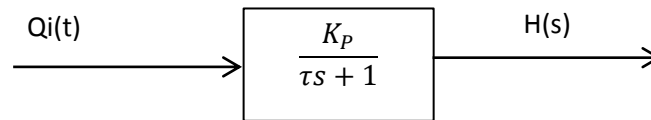


Figura 29. Diagrama de bloques que representa el sistema

De la figura 29 obtenemos la siguiente función:

$$G_P(s) = \frac{K_P}{\tau_1 s + 1} \quad (13)$$

Donde:

$G_P(s)$ = Función de transferencia del proceso

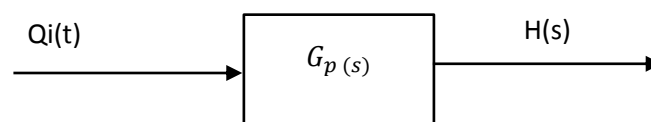


Figura 30. Diagrama de bloques simplificado con el cambio de variable

Hasta este paso solo tenemos el modelo del sistema, sin ningún controlador, para proseguir con la elaboración de este modelo introduciremos un controlador PID, la figura 35 nos presenta el diagrama a bloques con el controlador PID ($G_c(s)$) y las funciones de transferencia $G_V(s)$, $G_M(s)$, $G_L(s)$ a partir del cual obtendremos la función de transferencia del sistema.

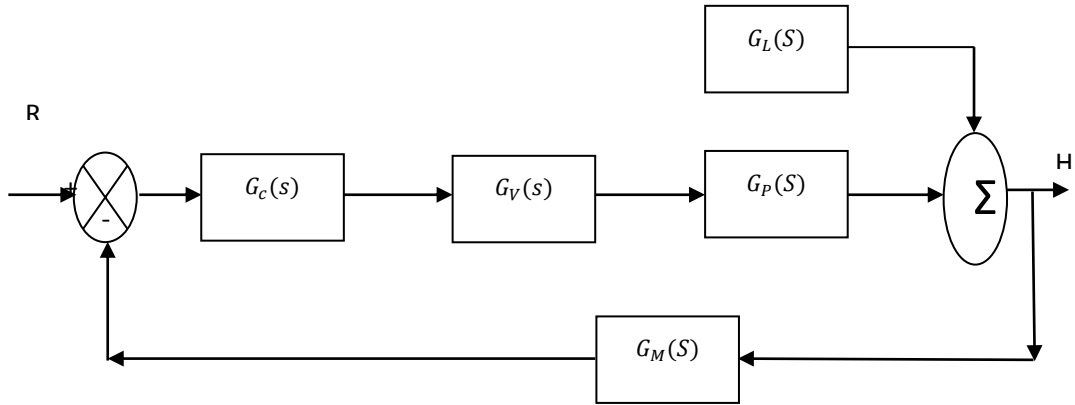


Figura 31. Diagrama de bloques del sistema con un control PID

Donde:

$G_L(s)$ =Funcion de transferencia de la carga

$G_p(s)$ =Funcion de transferencia del proceso

$G_c(s)$ =Funcion de transferencia del controlador

$G_M(s)$ =Funcion de tranferencia del sensor-transmisor

$G_V(s)$ = Funcion de transferencia de la valvula

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad (14)$$

$$G_c(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (15)$$

$$G_L(s) = \frac{K_L}{\tau_L s + 1} \quad (16)$$

$$G_M(s) = \frac{K_M}{\tau_M s + 1} \quad (17)$$

$$G_V(s) = \frac{K_V}{\tau_V s + 1} \quad (18)$$

Par continuar con el modelo de la función de transferencia se tienen las siguientes consideraciones:

$$\tau_M \ll \tau_p \Rightarrow G_M(s) = K_M$$

$$\tau_V \ll \tau_p \Rightarrow G_V(s) = K_V$$

Donde K_M y $K_V \approx 1$

Aplicando el algebra de bloques a la figura 35 obtenemos la siguiente función:

$$H(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1+G_C(s)G_P(s)} R(s) + \frac{G_L(s)}{1+G_C(s)G_P(s)} Q_i(s) \quad (19)$$

Para la función de transferencia tenemos las siguientes consideraciones:

El flujo de entrada no varia es decir su variación de desviación es cero $Q_i(s) = 0$

Donde $R(s) = \frac{1}{s}$

$$H(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1+G_C(s)G_P(s)} \quad (20)$$

$$H(s) = \frac{K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s) \frac{K_P}{\tau_P s + 1}}{1 + K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s) \frac{K_P}{\tau_P s + 1}}$$

$$H(s) = \frac{\frac{K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s) K_P}{\tau_P s + 1}}{\frac{\tau_P s + 1 + K_P K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s)}{\tau_P s + 1}}$$

$$H(s) = \frac{K_P(\tau_P s + 1)(K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s))}{\tau_P s + 1 + K_P K_C(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s)}$$

$$H(s) = \frac{K_P \tau_P s + K_P(K_C(\frac{\tau_i s + 1 + \tau_i s \tau_d s}{\tau_i s}))}{\tau_P s + 1 + K_P(K_C(\frac{\tau_i s + 1 + \tau_i s \tau_d s}{\tau_i s}))}$$

$$H(s) = \frac{K_P \tau_P s + \frac{K_P K_C \tau_i s + K_P K_C + K_P K_C \tau_i s \tau_d s}{\tau_i s}}{\tau_P s + 1 + \frac{K_P K_C \tau_i s + K_P K_C + K_P K_C \tau_i s \tau_d s}{\tau_i s}}$$

$$H(s) = \frac{\tau_i s K_P \tau_P s + K_P K_C \tau_i s + K_P K_C + K_P K_C \tau_i s \tau_d s}{\tau_P s \tau_i s + \tau_i s + K_P K_C \tau_i s + K_P K_C + K_P K_C \tau_i s \tau_d s} \quad (21)$$

De la función de transferencia obtenida anteriormente obtenemos la ecuación característica, la cual es importante ya que con ella podemos saber si nuestro sistema es controlable.

$$H(s) = \frac{\tau_i s K_p \tau_p s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}{\tau_p s \tau_i s + \tau_i s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}$$

Para finalizar se calcula los valores de K_c con las siguientes ecuaciones del instrumento:

$$K_1 = \frac{R_{f2}}{R_3} = \text{Ganancia proporcional} \quad (22)$$

$$\tau_i = \frac{1}{R_i C_i} = \text{Constante de integracion} \quad (23)$$

$$\tau_d = R_d C_d = \text{Constante derivativa} \quad (24)$$

3.2 Estructura física del proceso de control

La estructura del proceso de control de nivel de líquidos retroalimentado con alimentación continua y variable esta constituida con los elementos del siguiente cuadro.

Cuadro 3. Componentes para el proceso de control

Ref.	Nombre del elemento
1	Sensor ultrasónico
2	Tanque
3	Electroválvula proporcional servoaccionada
4	Neplo de $\frac{3}{4}$ "
5	Válvulas de bola
6	Bomba de 1/2 HP
7	Reservorio
8	Válvula check
9	Unidad Central de Proceso
10	Tarjeta de control y adquisición de datos.

3.3 Implementación del sistema de control

3.3.1 Implementación de la simulación del sistema de control en computadora.

Para implementar una simulación con un lazo de control se requiere realizar los siguientes pasos:

3.3.1.1 Implementación de PID y función de transferencia. Se empieza navegando en la paleta de funciones de la pantalla blockdiagram de labview hacia la subpaleta Control Desing&Simulation.

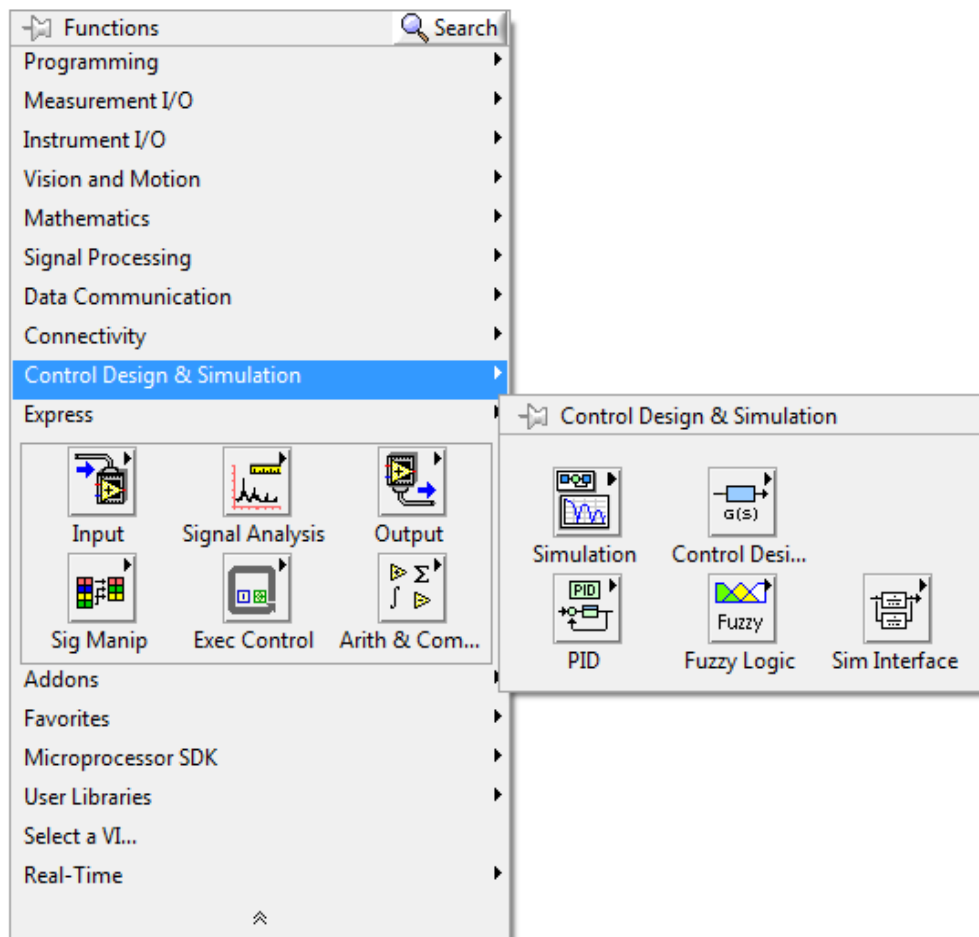


Figura 32. Subpaleta Control Desing&Simulation

Con las herramientas virtuales de la subpaleta Control Desing&Simulation se programa el diagrama de bloques como lo indica la figura 33.

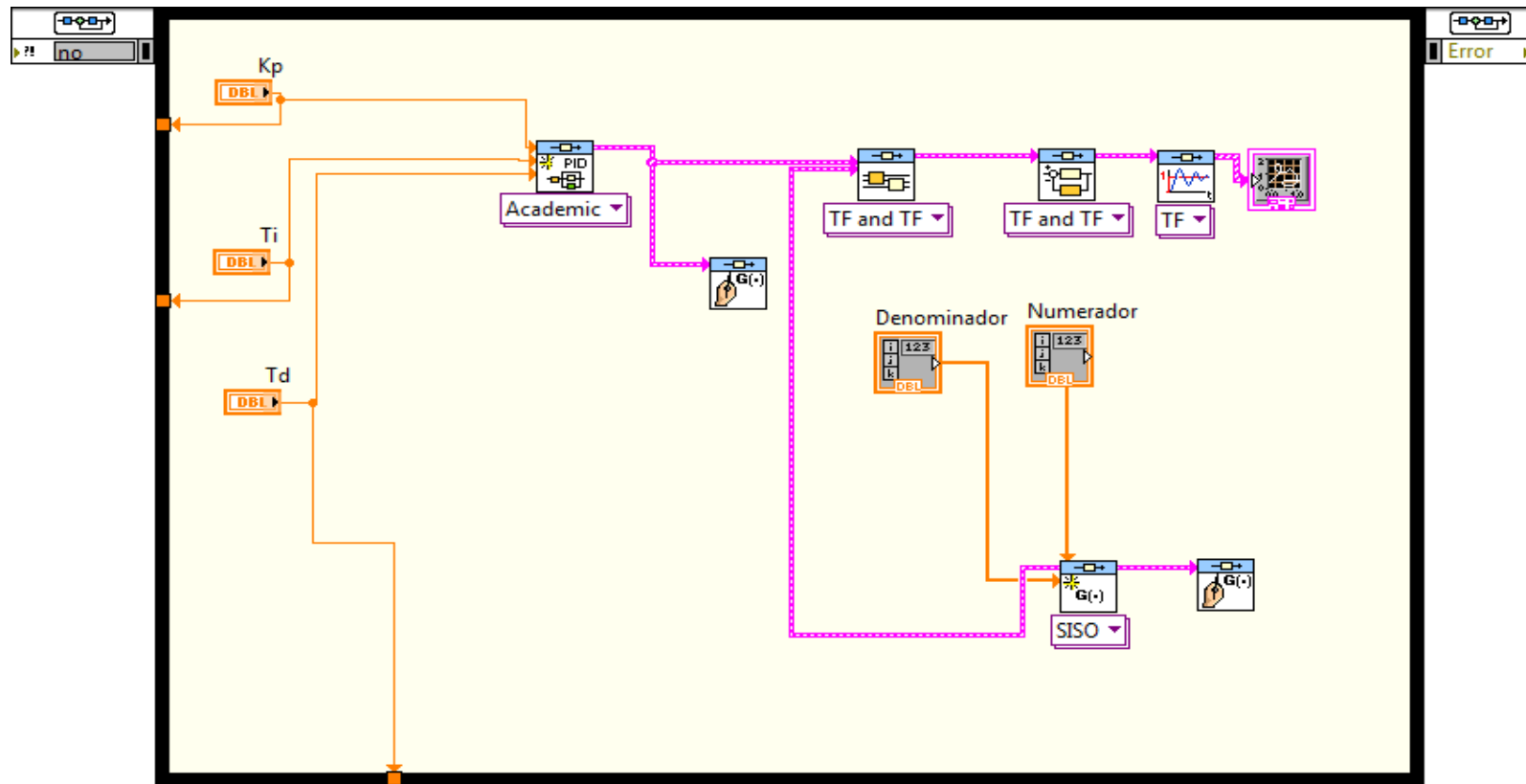


Figura 33. Diagrama de bloques para PID y función de transferencia

Con el diagrama de bloques programado, se navega al panel frontal y se despliegue las subpaletas de controls como lo indica la figura 34.

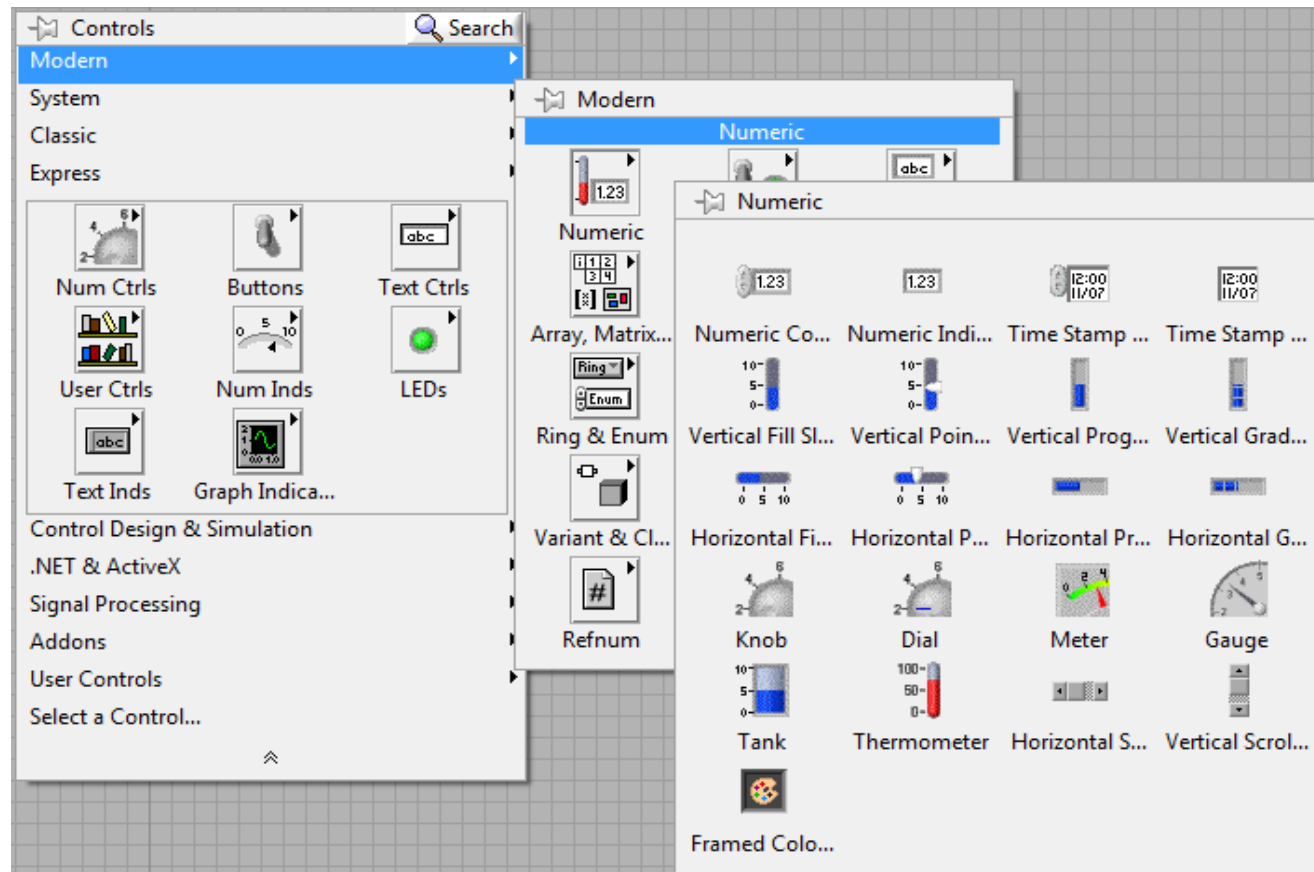


Figura 34. Paleta Controls

Utilizando las subpaletas de controls se programa el panel frontal para las funciones PID y función de transferencia como lo indica la figura 35.

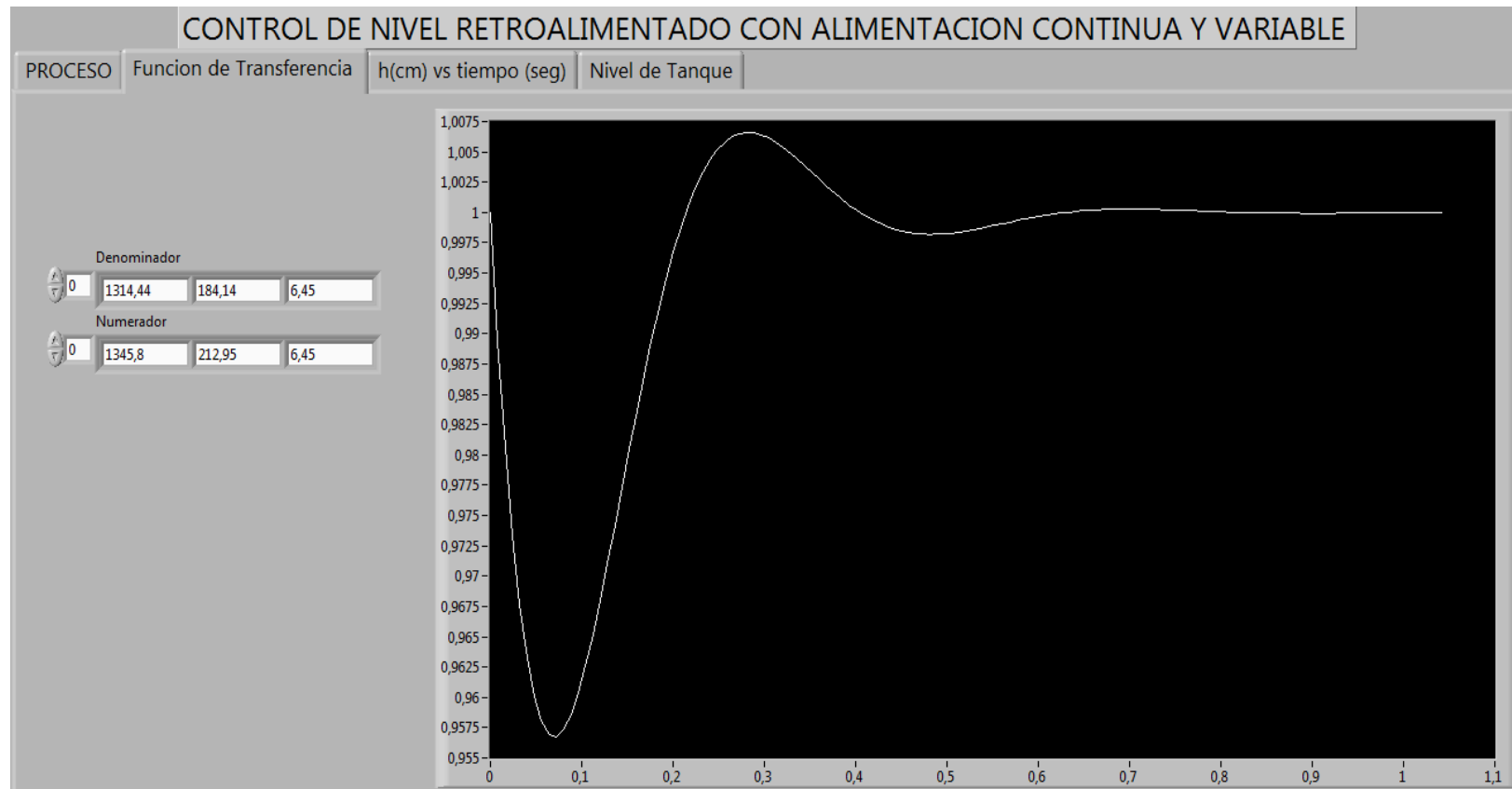


Figura 35. Función de transferencia (panel frontal)

3.3.1.2 Implementación de las herramientas virtuales para el control de proceso. Se empieza por desplegar los paletas funtions en la pantalla blockdiagram y controls en la pantalla panel frontal.

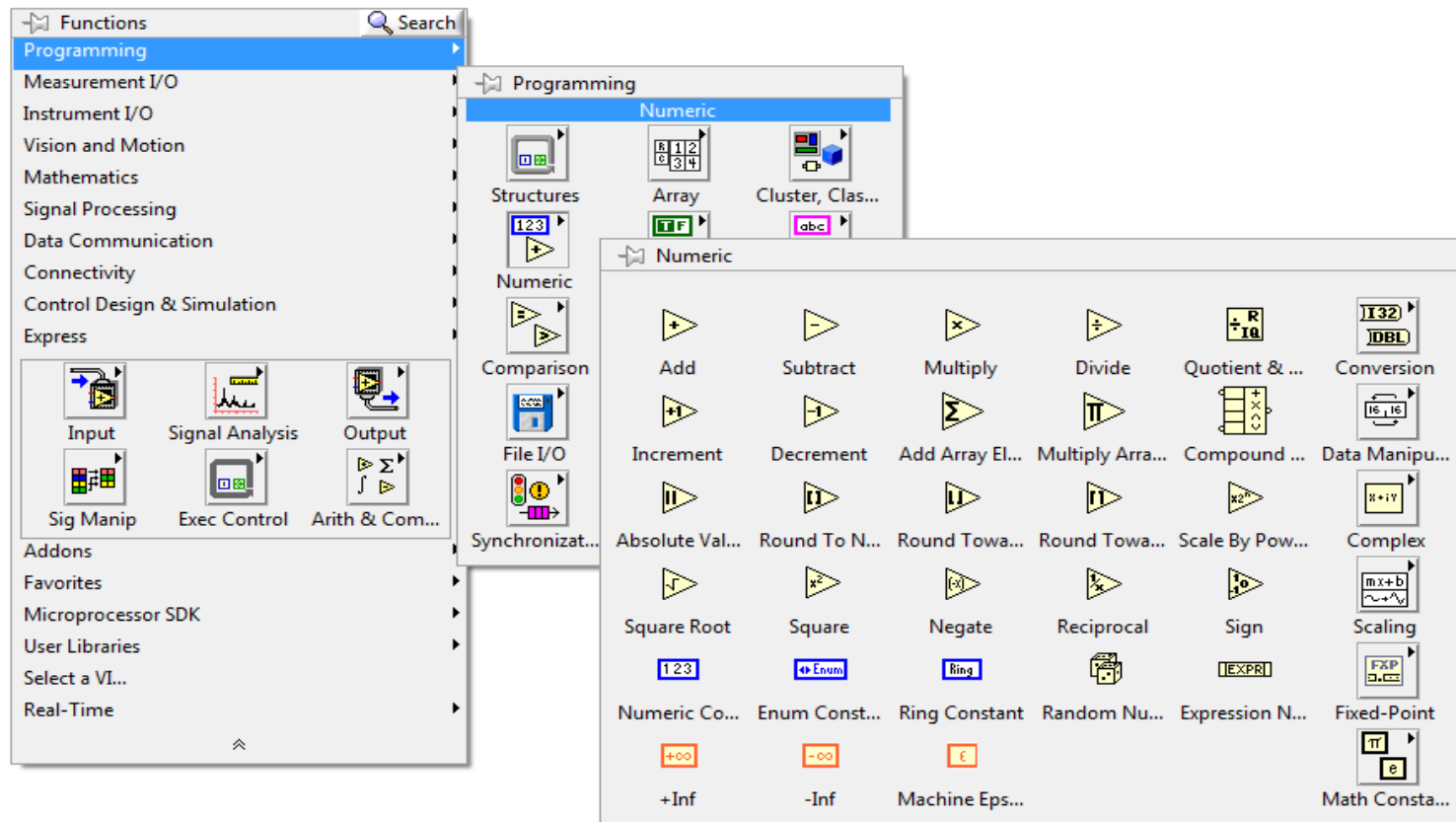


Figura 36. Paleta Funtions

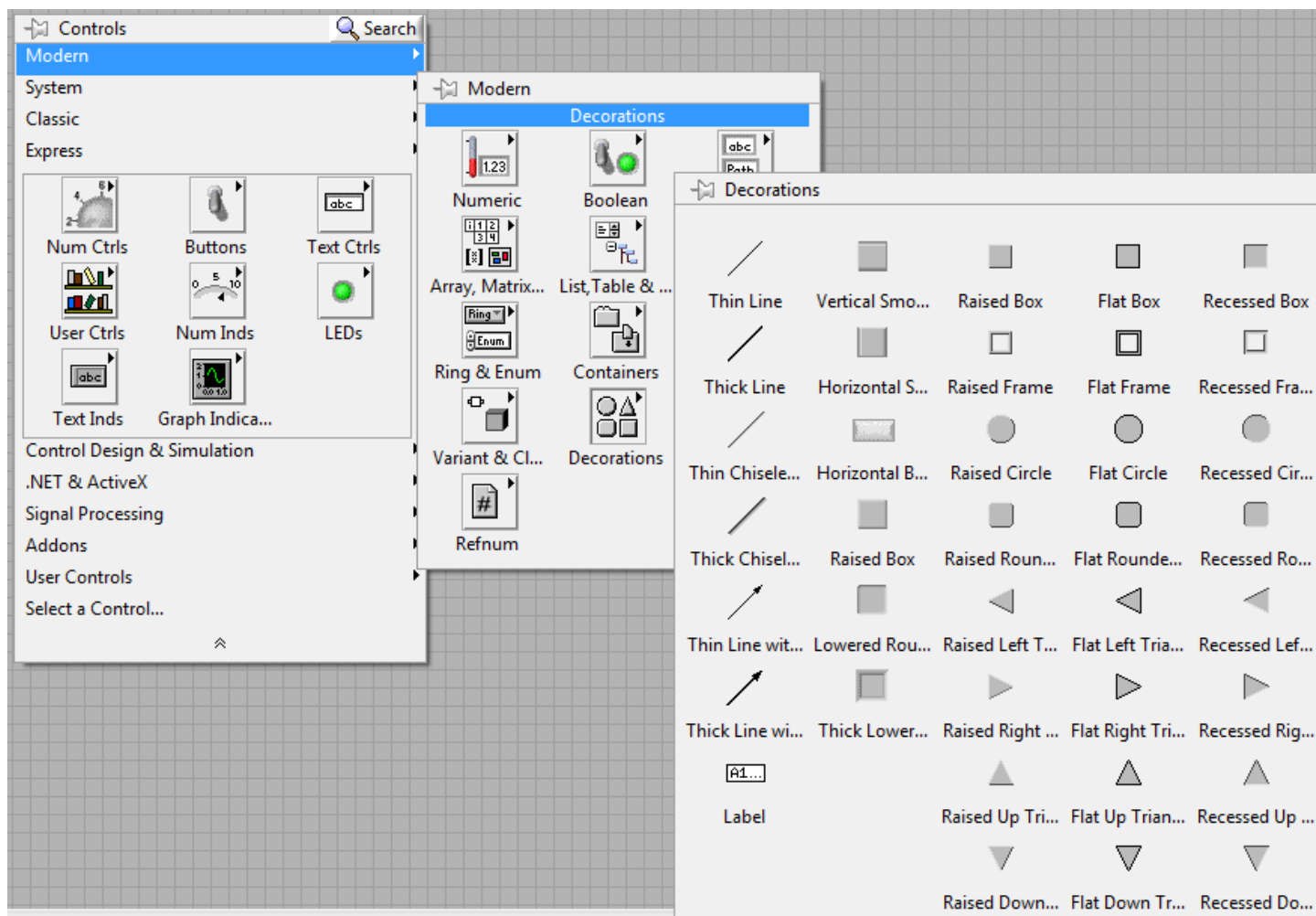


Figura 37. Paleta Control

Con las paletas desplegadas se continúa programando la herramienta virtual del reservorio en el diagrama de bloques como se indica en la figura 38.

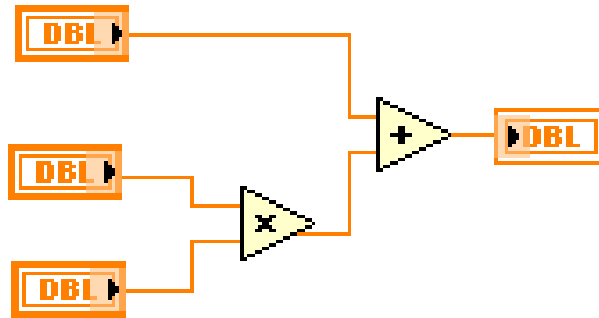


Figura 38. Herramienta virtual del reservorio

En el panel frontal se realiza la programación como lo indica la figura 39.

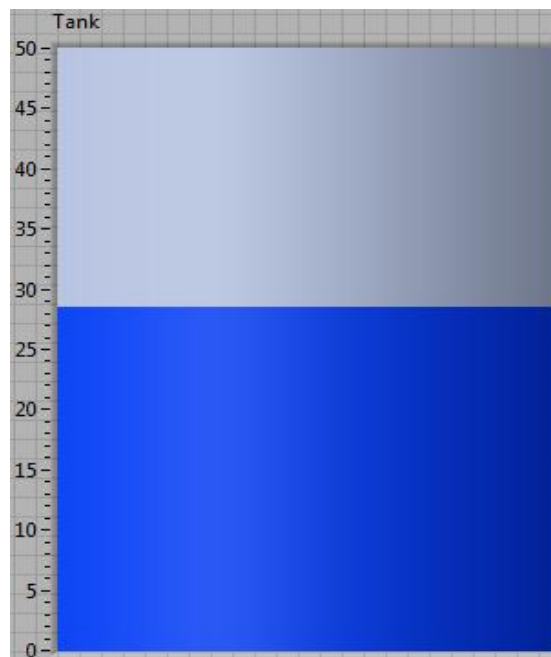


Figura 39. Herramienta virtual para el reservorio (panel frontal)

Se prosigue con la herramienta virtual PID ,se desarrolla el diagrama de bloques como lo indica la figura 40.

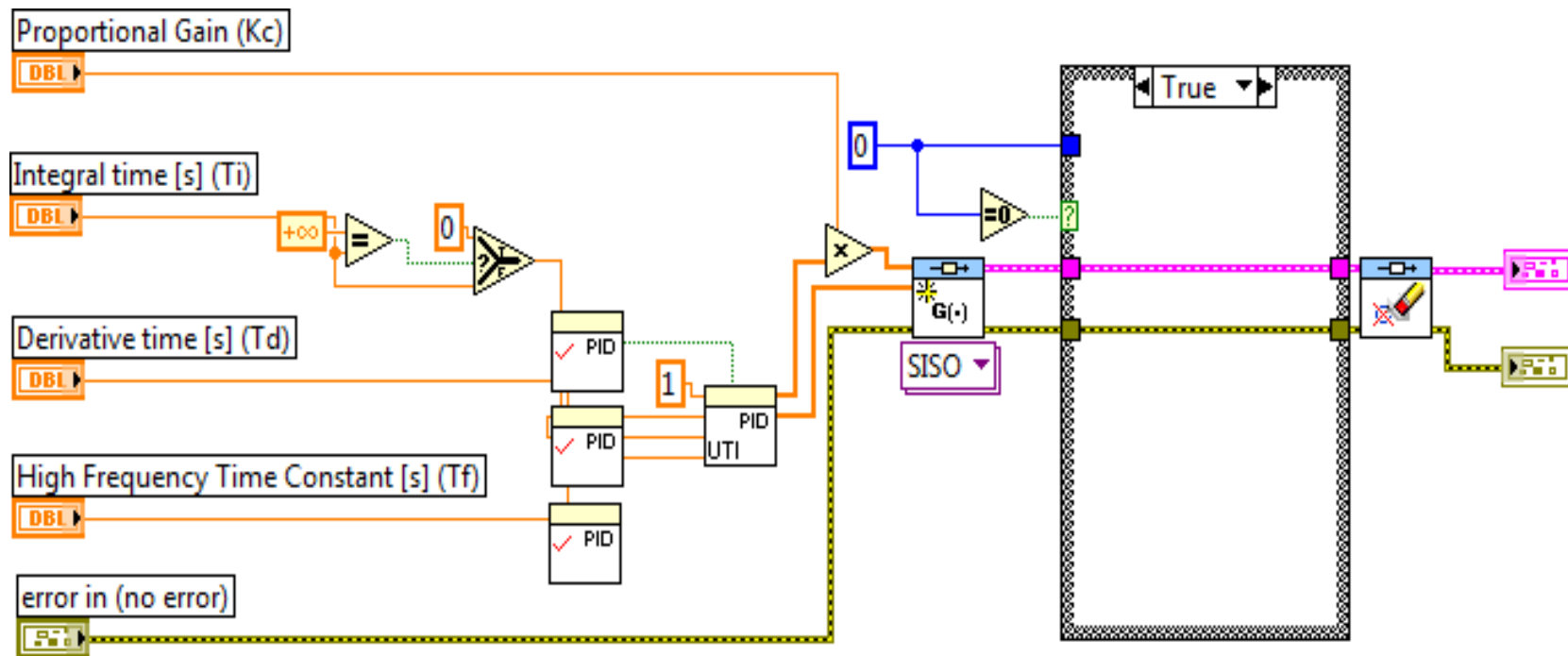


Figura 40. Herramienta virtual de control PID

La configuración del panel frontal para el control PID se realiza como indica la figura 41.

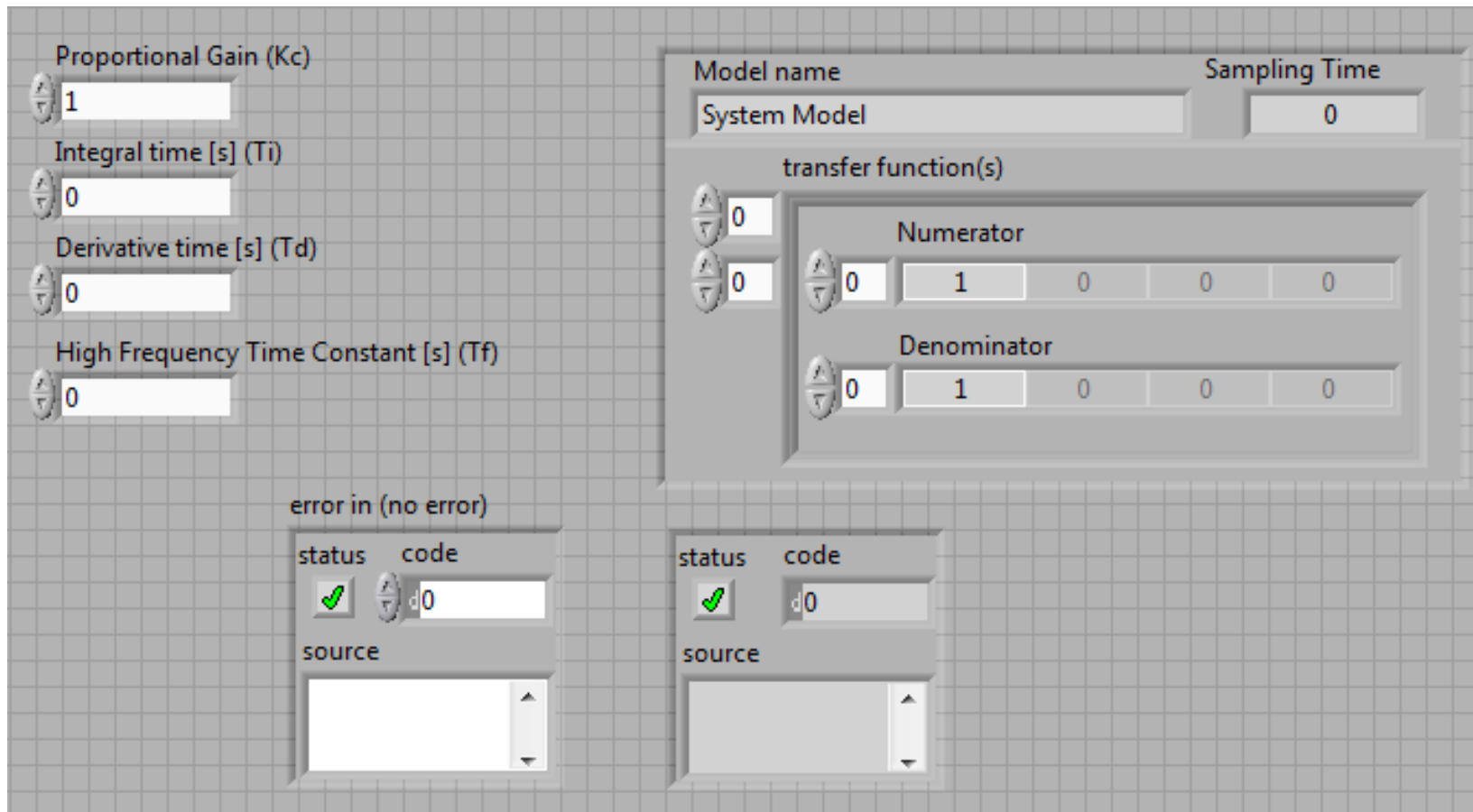


Figura 41. Herramienta virtual de control PID (panel frontal)

Con las herramientas virtuales implementadas en el software se guarda cada una como un solo icono, y se procede a conectar como una solo herramienta virtual de acuerdo a las figuras 42 y 43.

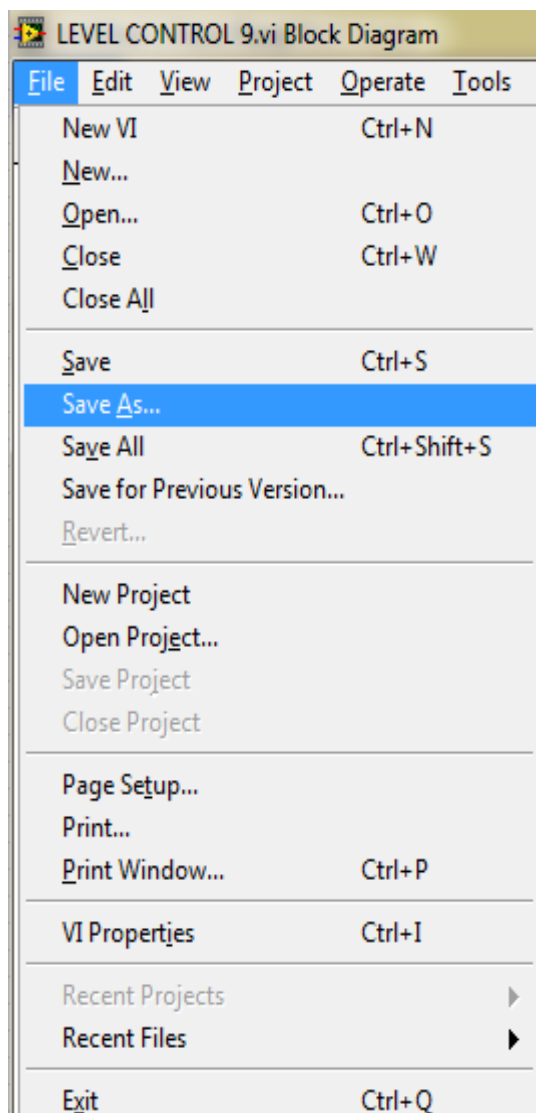


Figura 42. Menú para guardar una VI

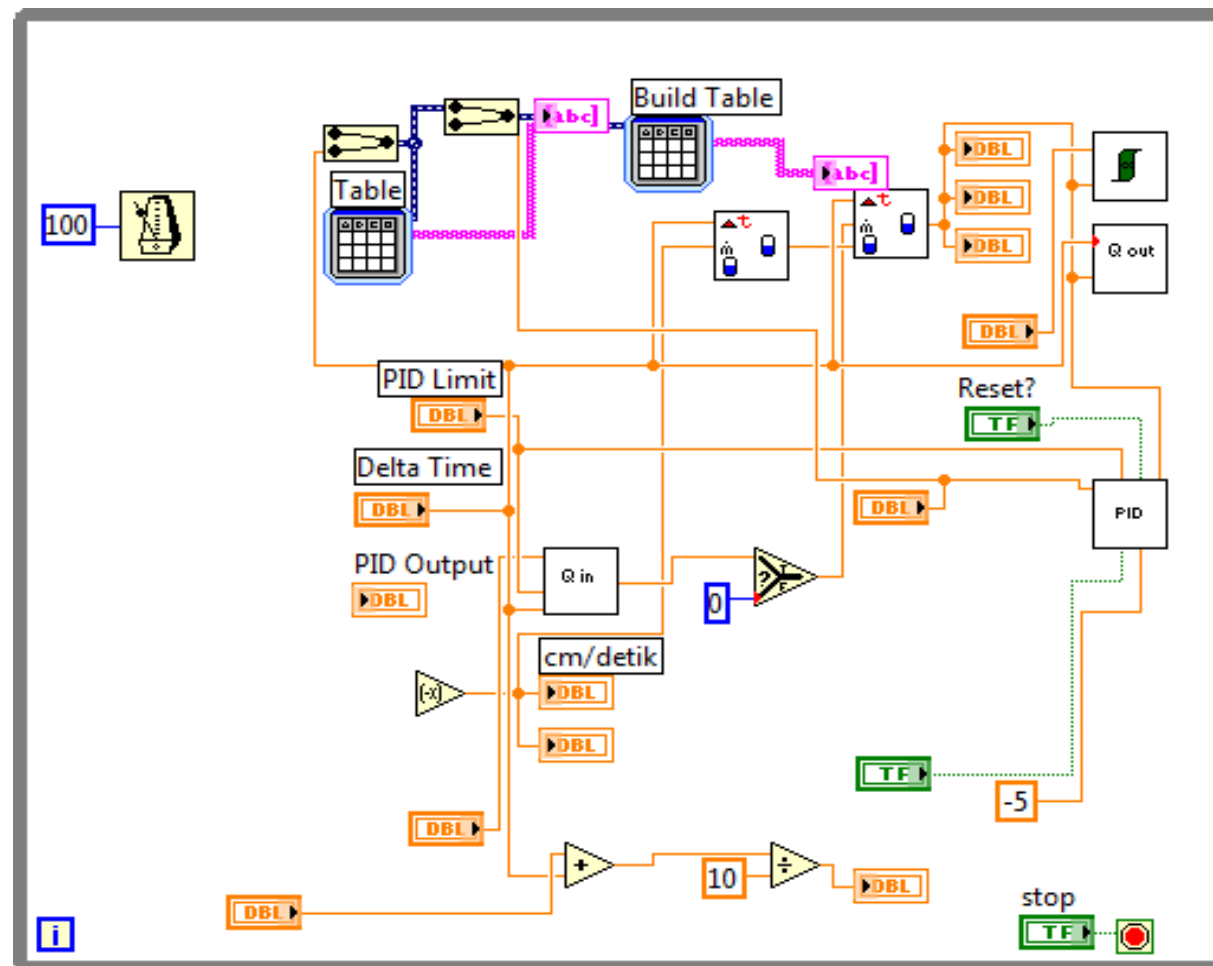


Figura 43. Herramienta virtual para el control proceso

La configuración del panel frontal se realiza como indica las figuras 44; 45; 46;47.

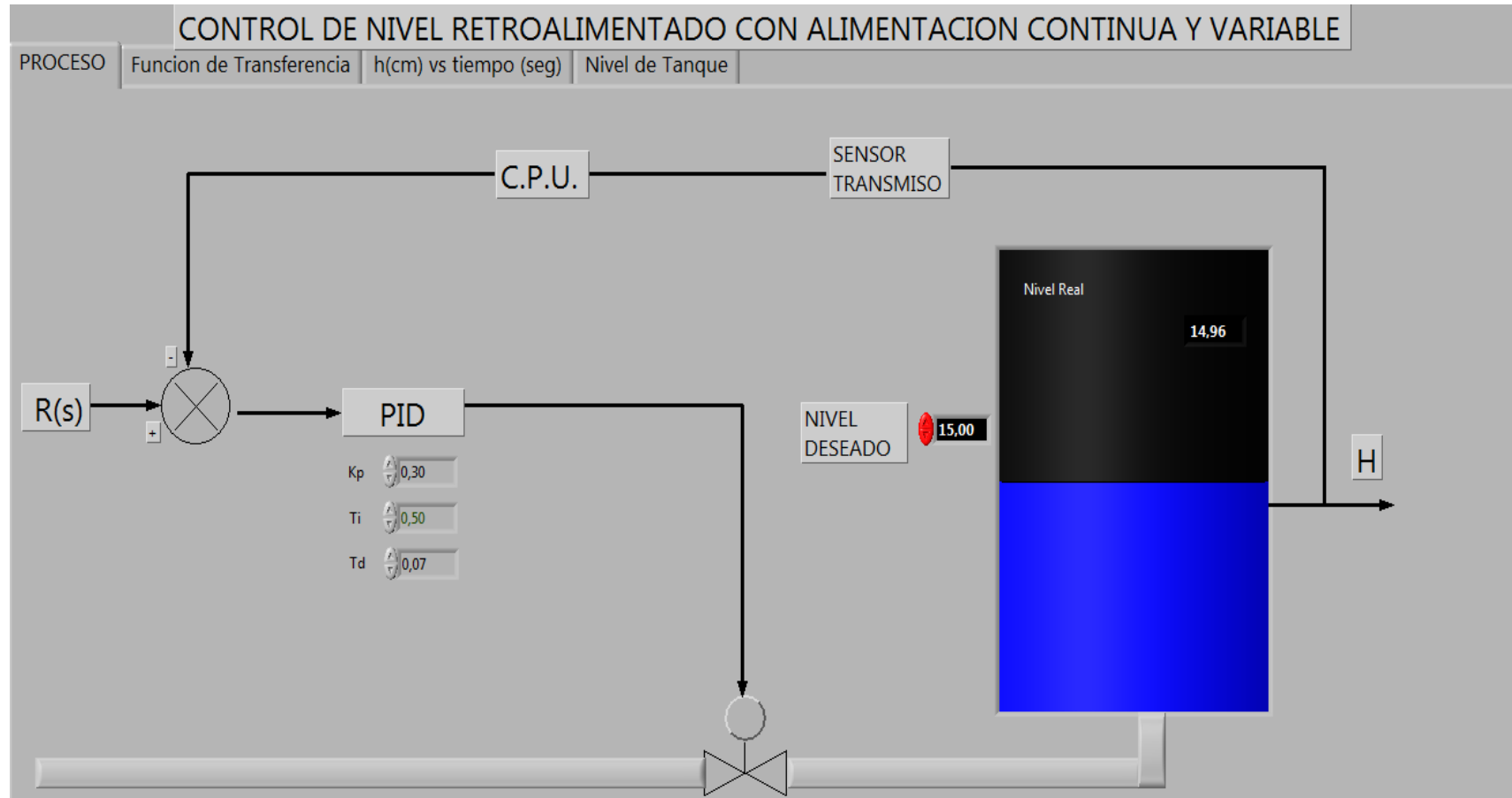


Figura 44. Herramienta virtual control de proceso (panel frontal)

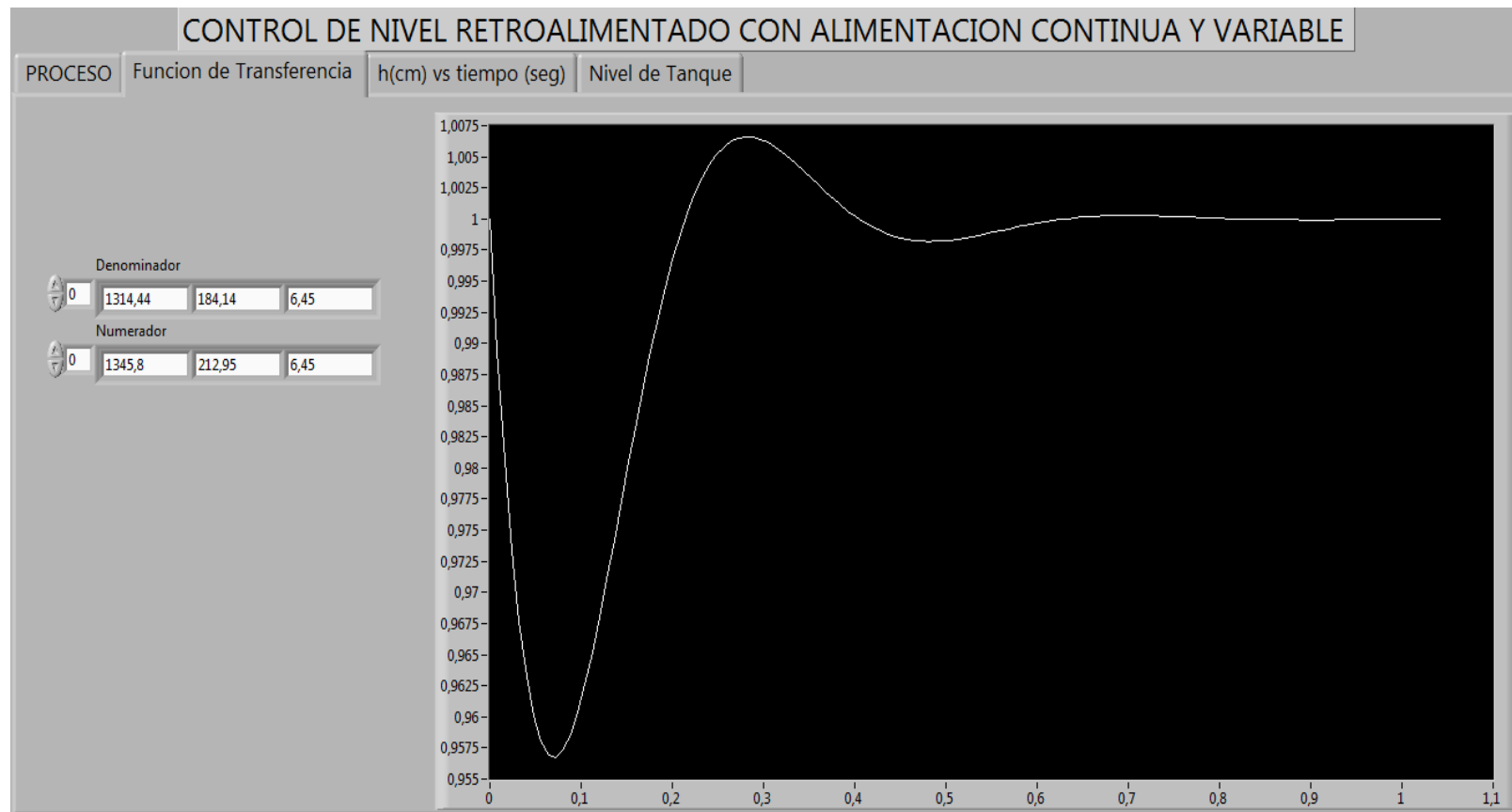


Figura 45. Función de Transferencia

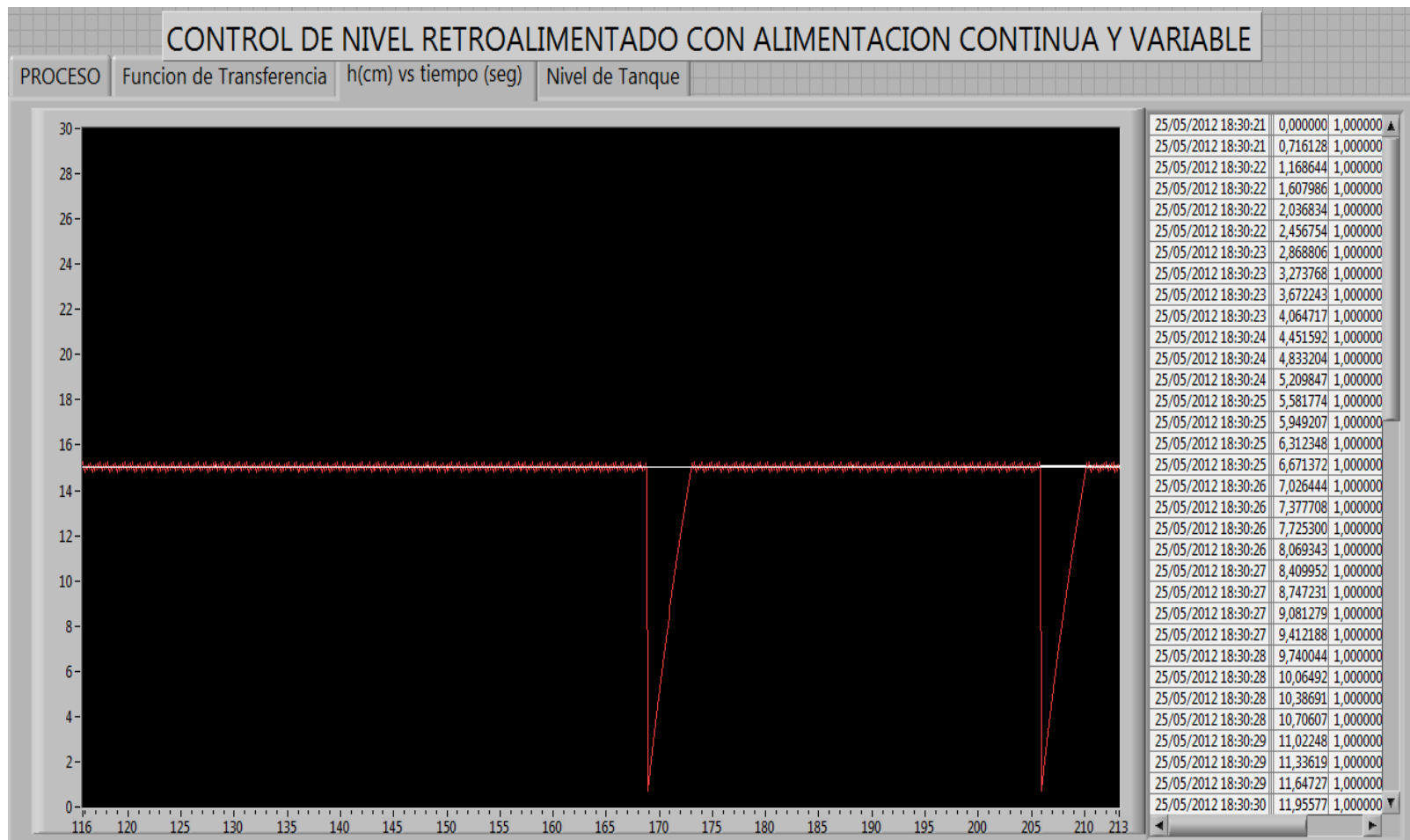


Figura 46. Altura en función del tiempo (panel frontal)

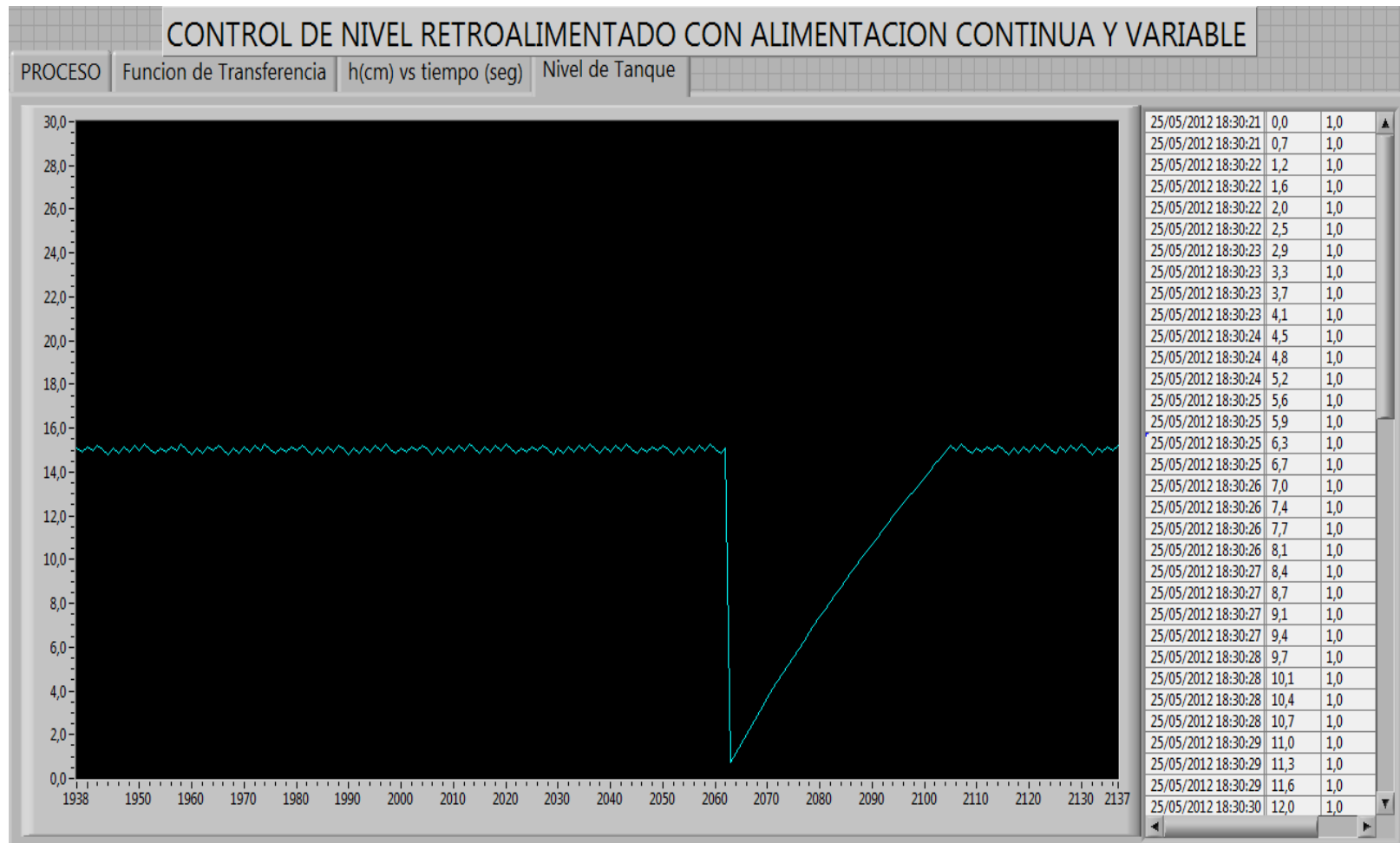


Figura 47. Nivel del Tanque

Con las herramientas virtuales función de transferencia y control de nivel del proceso en el software se procede a conectarlas como lo indica la figura 48.

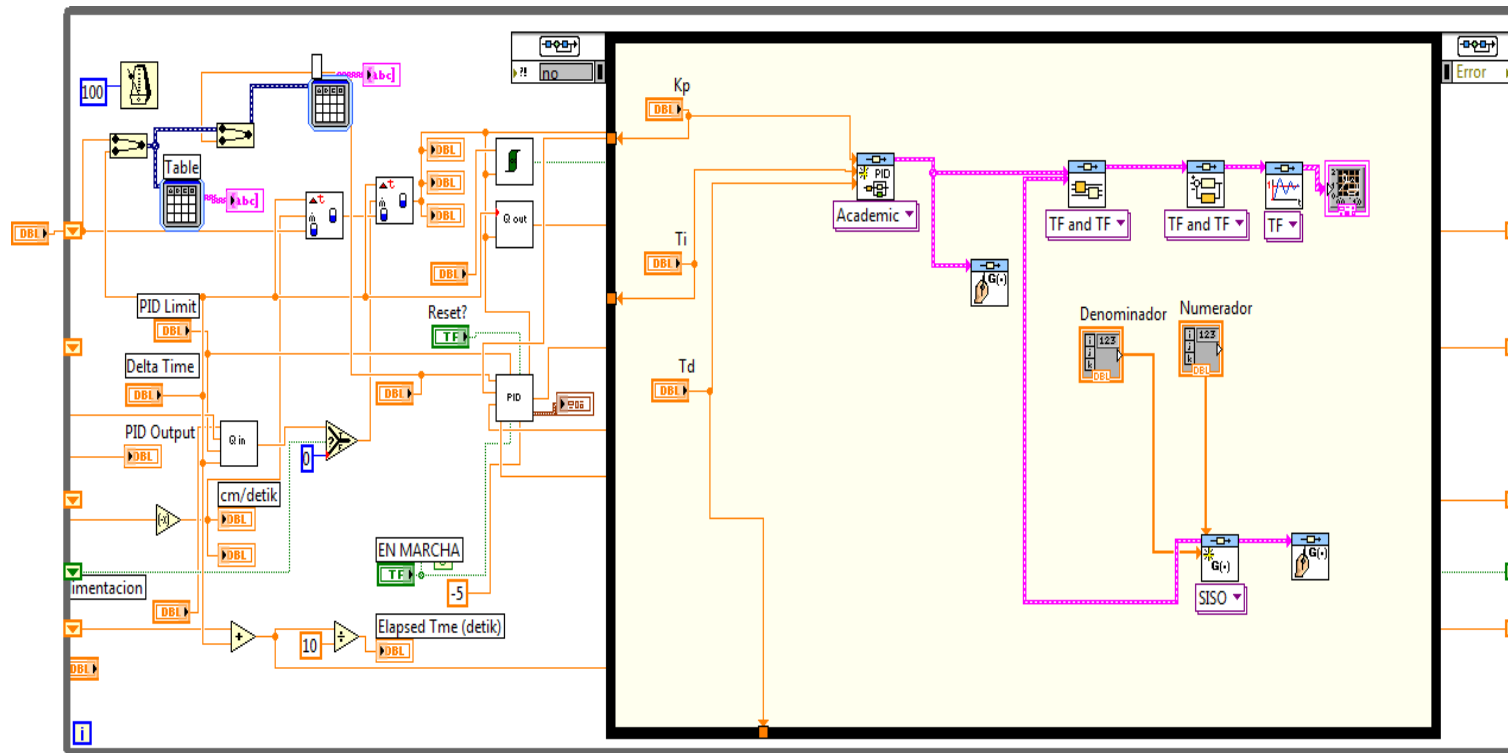


Figura 48. Conexión de las herramientas virtuales control de proceso, PID y función de transferencia

3.3.2 Implementación del sistema de control en el equipo

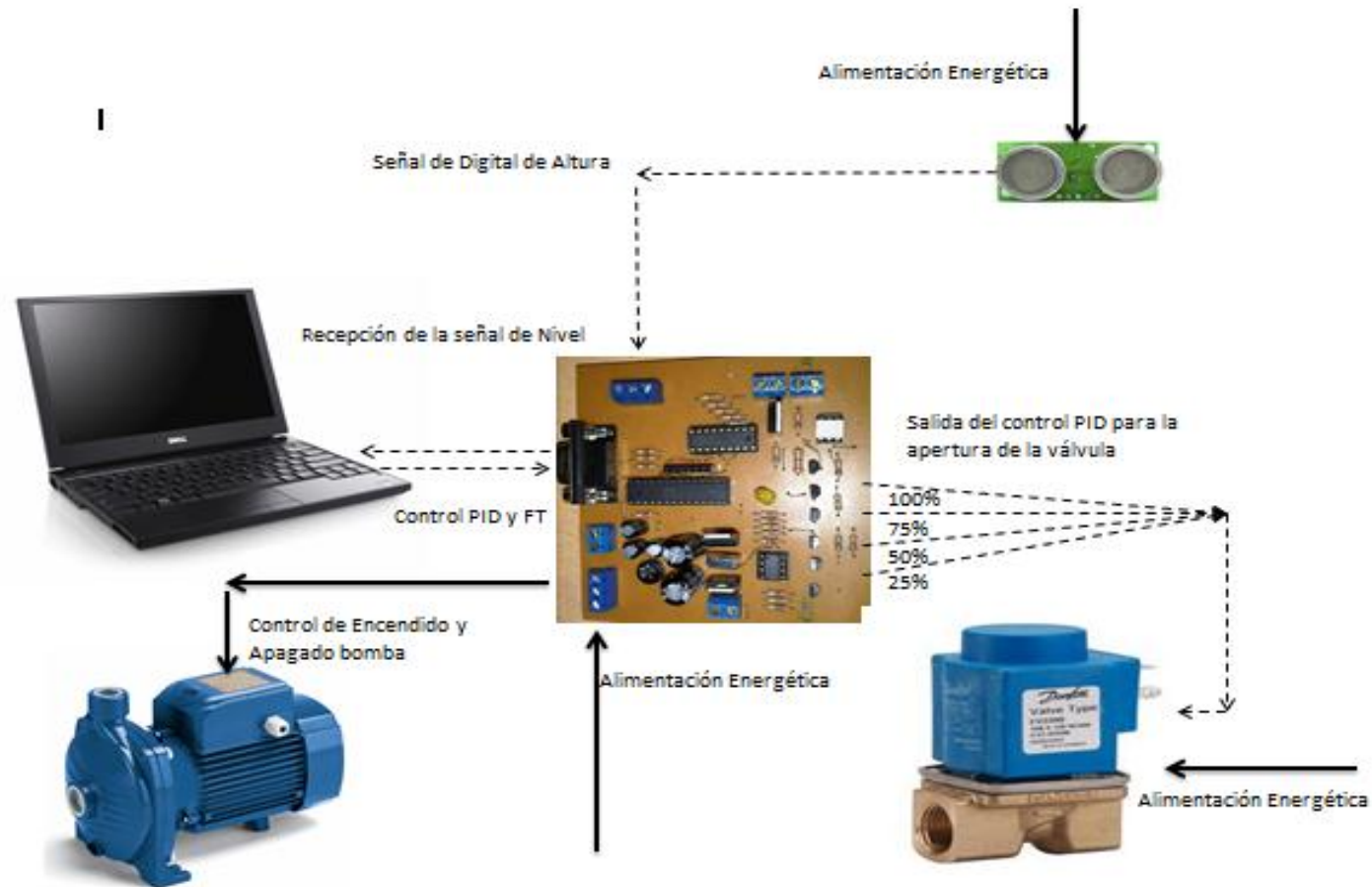


Figura 49. Sistema de control en el equipo

El sistema de control se implemento de acuerdo a la figura 54 donde el sensor ultrasónico mide la altura del liquido en el tanque y envía una señal digital a la tarjeta de control, por medio de una interface USB la señal es procesado en el software labview y emitida nuevamente a la tarjeta mediante salida del control PID , con la salida del PID y la función de transferencia de la tarjeta se regula la apertura de la válvula por medio de resistencias que emiten un voltaje de 4a 20 mA. regulando la alimentación al tanque. El sistema de control se retroalimenta con la señal del sensor ultrasónico y el valor del Set Point configurado.

3.3.2.1 Implementación del software para el sistema de control en el equipo.

Se empieza navegando en la paleta de funtions de la pantalla blockdiagram de labview hacia la subpaleta Instruments como lo indica la figurara 50.

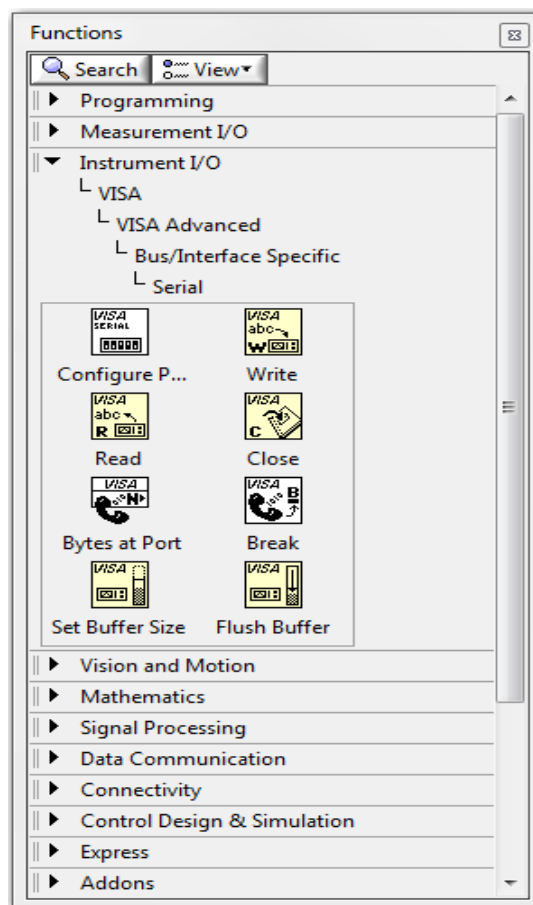


Figura 50. Sistema de control en el equipo

Con las herramientas de programación de la subpaleta Instrument I/O se realiza la interface de comunicación de la tarjeta de control con el computador como lo indica el diagrama de bloques de la figura 51.

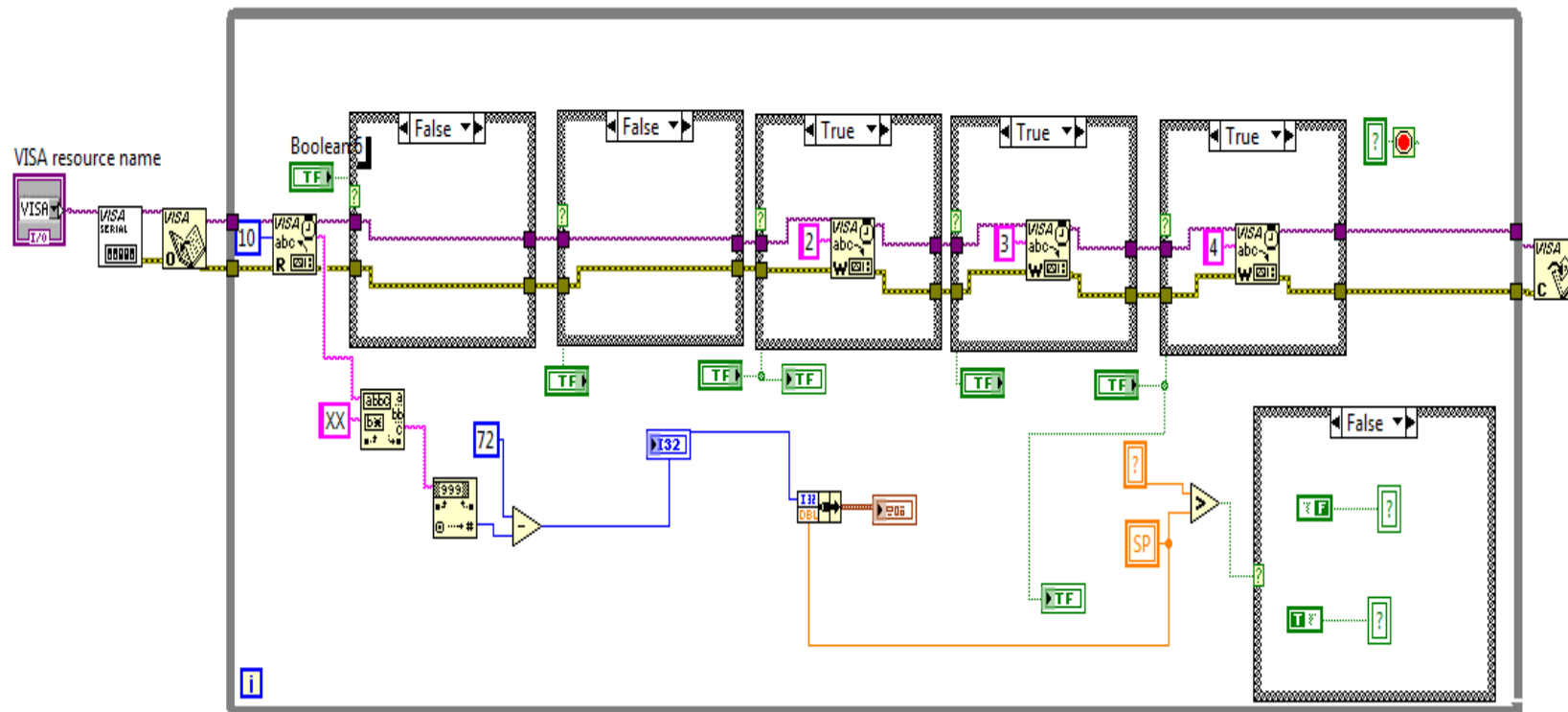


Figura 51. Diagrama de bloques para la interface de comunicación

Se continúa con la programación del diagrama de bloques para el control PID, para lo cual se navega en la paleta functions a la subpaleta control desing&simulation.

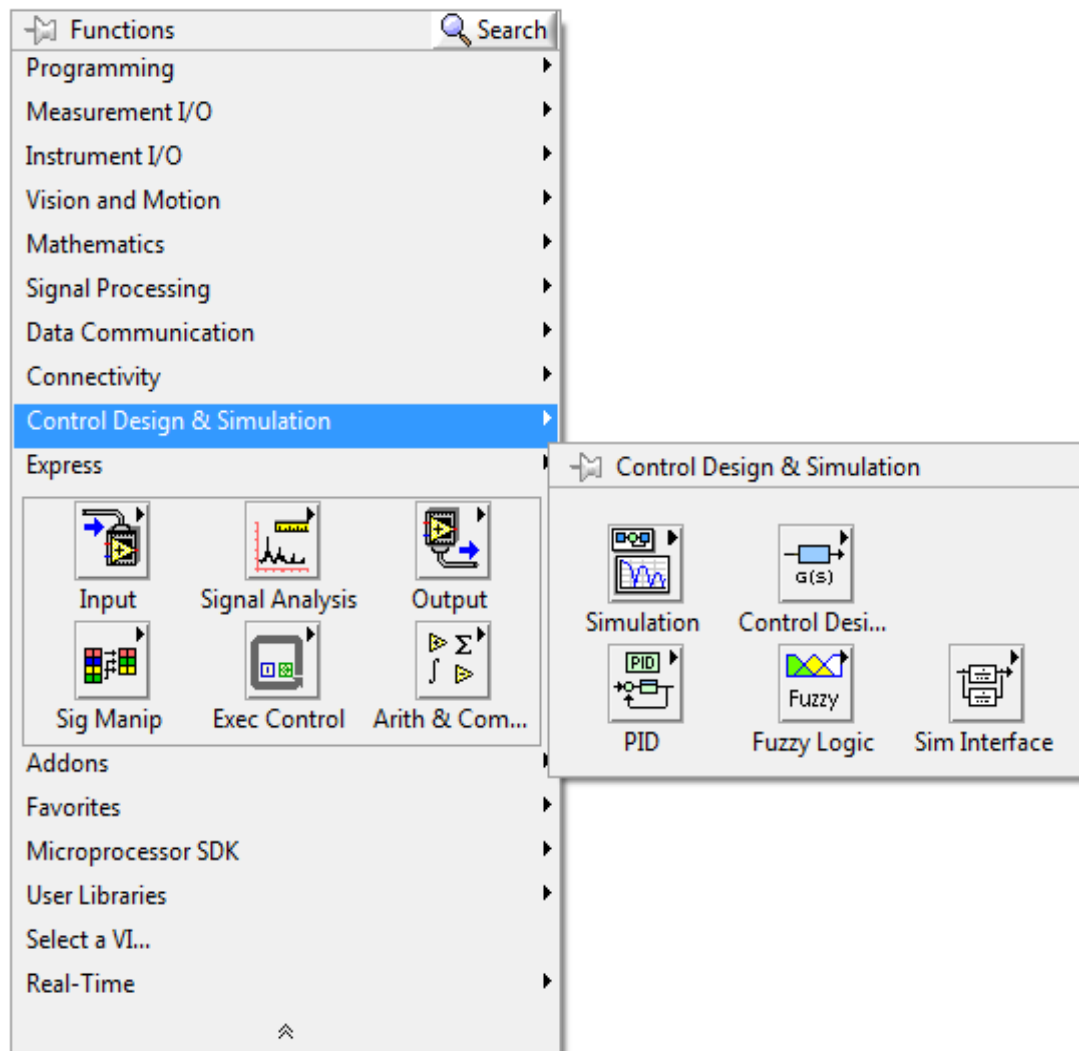


Figura 52. Subpaleta control desingn&simulation

Utilizando la subpaleta control desingn&simulationse programa el diagrama de bloques para el control PID en el equipo como lo indica la figura 53.

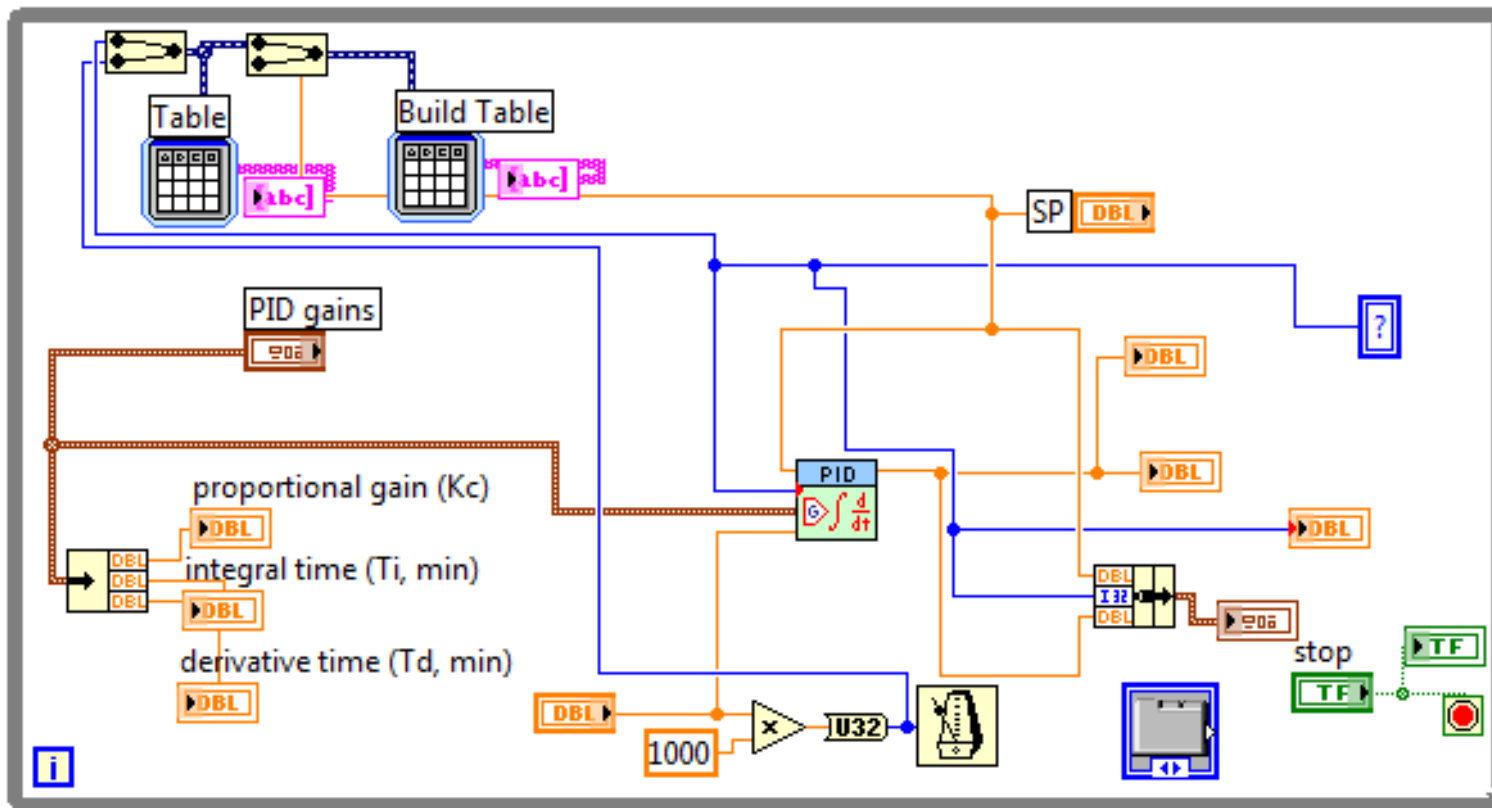


Figura 53. Diagrama de bloques para el control PID en el equipo

subpaleta control desing&simulationcomo lo indica la figura 54.

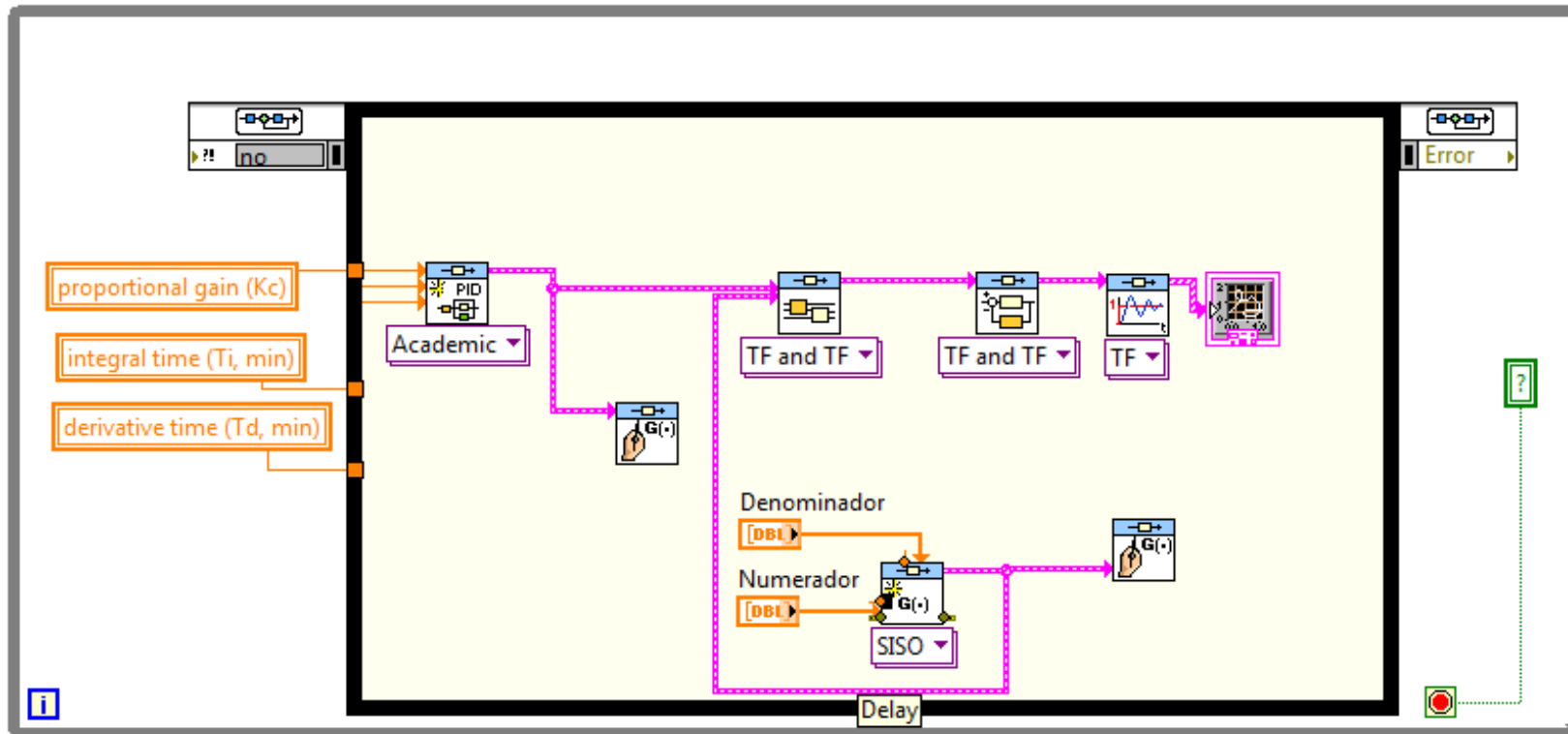


Figura 54. Diagrama de bloques para la función de transferencia

Para finalizar la programación del sistema de control en el equipo se navega a la pantalla panel frontal de labview. En la pantalla panel frontal se navega a la subpaleta modern – numeric como lo indica la figura 55.

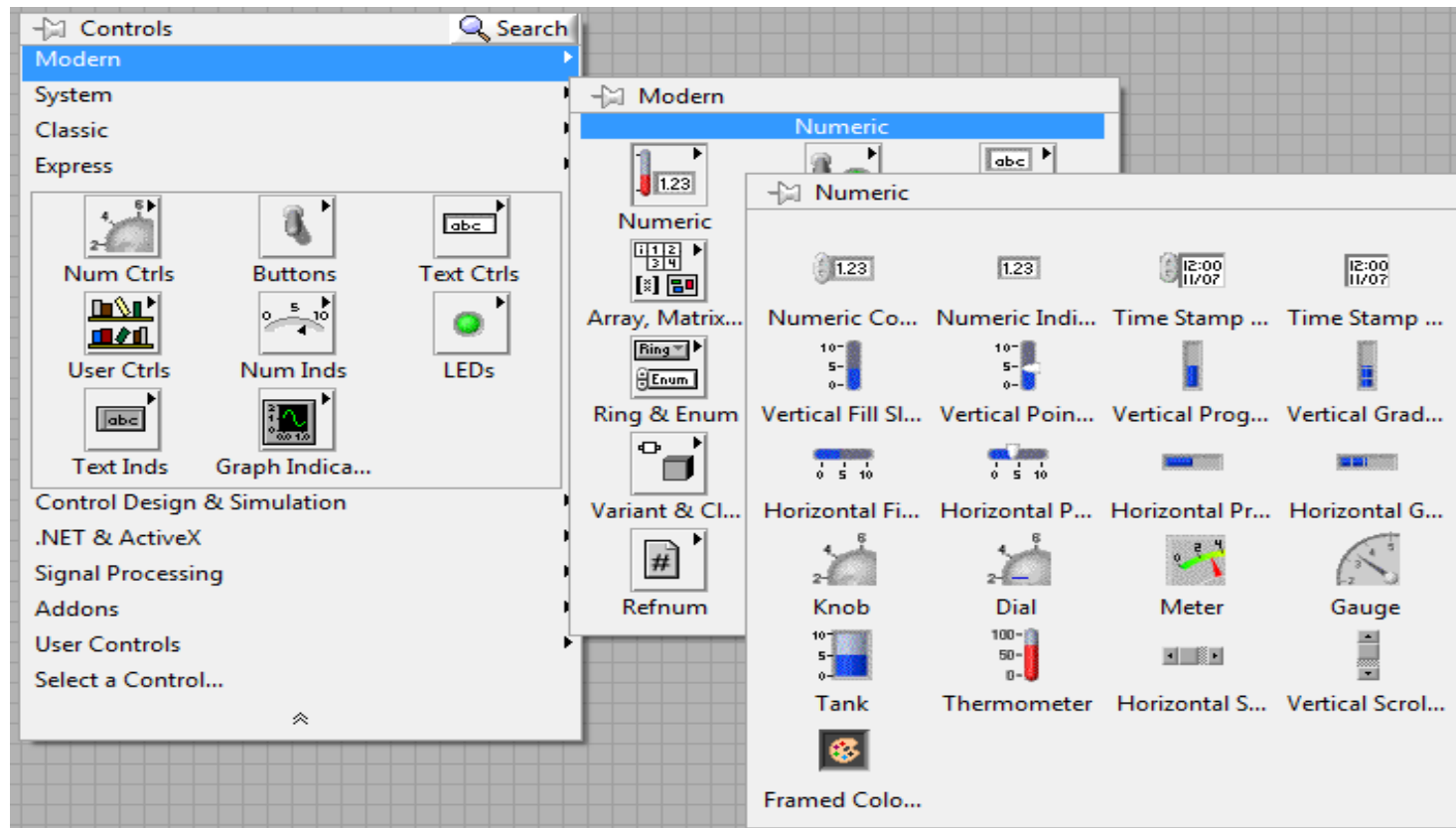


Figura 55. Subpaletas Modern-Numeric

Con las herramientas de las subpaletas modern y numeric se diseña el panel frontal como lo indica las figuras 56, 57,58.



Figura 56. Herramienta virtual de control en el equipo (panel frontal)

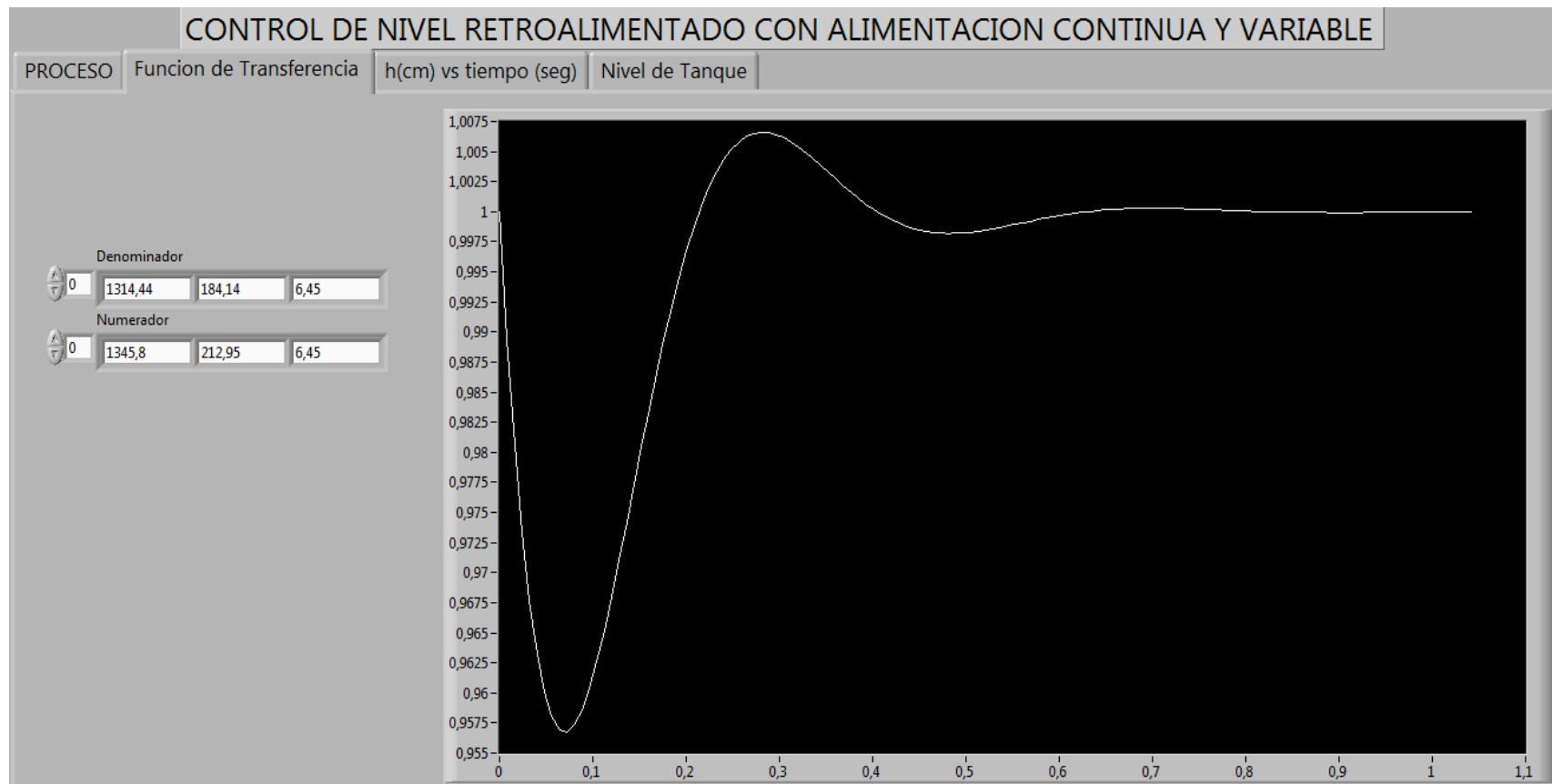


Figura 57. Función de Transferencia en el equipo (panel frontal)

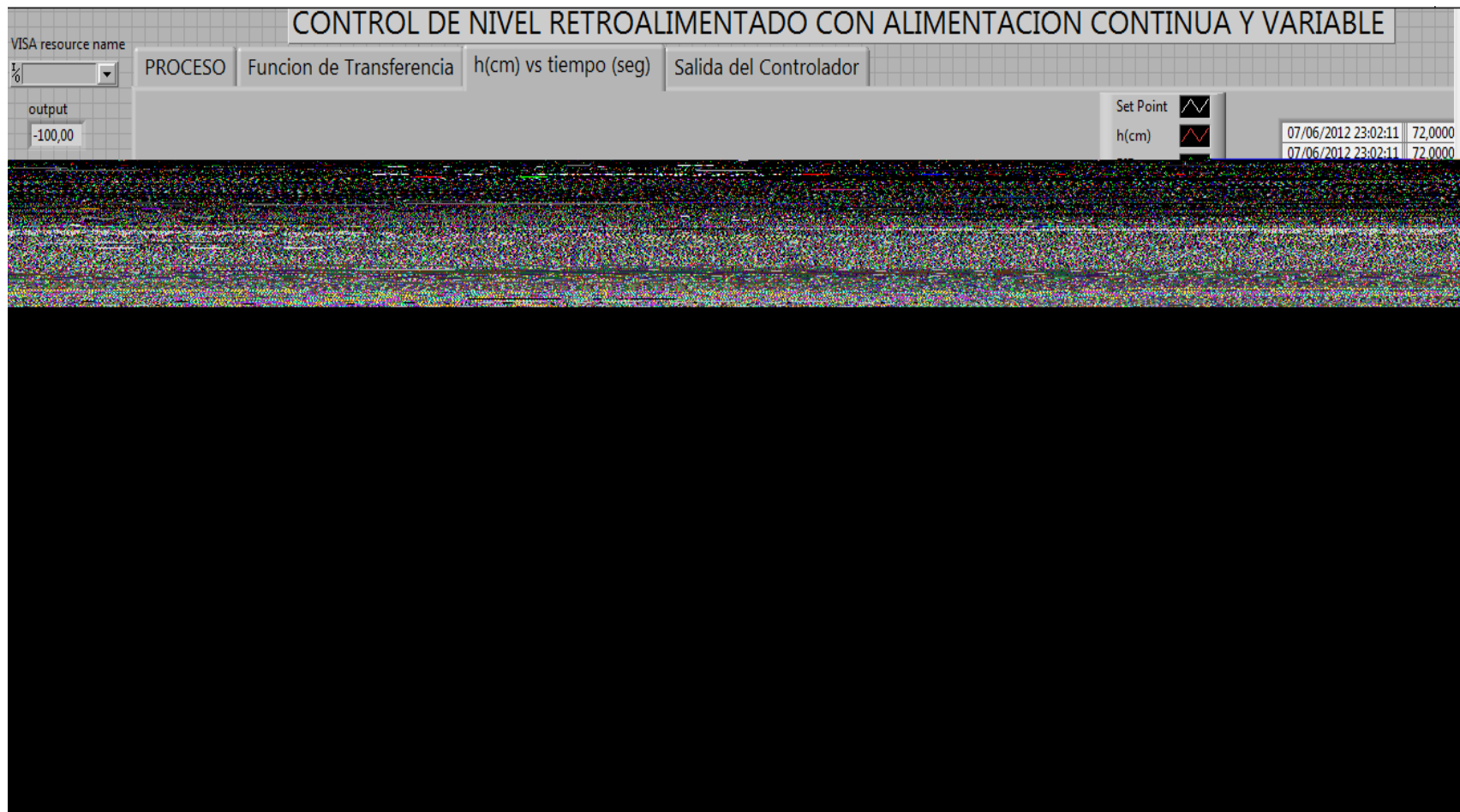


Figura 58. Altura como función del tiempo en el equipo (panel frontal)

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1 Cálculo modelo para el agua de la función de transferencia con alimentación continua

La alimentación continua del líquido se realiza con la válvula completamente abierta.

Datos:

Tabla 1. Datos para el cálculo de la función de transferencia

Datos	Valor	Dimensiones
δ	1000	$\frac{kgm}{m^3}$
K_V	5	$\frac{m^3}{min * psi^{\frac{1}{2}}}$
g	9,81	$\frac{m}{s^2}$
\bar{h}	0,40	m
Patm	101337.3	N/m^2

4.1.1 Cálculo del caudal máximo para la válvula q_{max}

$$q_{max} = v A_v$$

$$v = \sqrt{2gh_{max}}$$

$$v = \sqrt{2 \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (4,85m)} = 4,85 \frac{m}{s}$$

$$A_v = \pi r^2$$

$$A_v = 3.1416(0,01905m)^2$$

$$A_v = 0,00114 m^2$$

$$q_{max} = 0,0055 \frac{m^3}{s} = 332 \frac{lt}{min} = 87,71 \frac{gal}{min}$$

4.1.2 Cálculo del Área del reservorio

$$A = l * h$$

$$A = 0,75m * 0,20m$$

$$A = 0,15 m^2$$

4.1.3 Cálculo de la constante C_1

Se utiliza los siguientes valores de operación:

$h = 0,20m$, $K_v = 100\% = 1$, P_2 se considera constante por lo que la consideramos $=0$

Con estas condiciones proseguimos a realizar los cálculos para C_1

$$C_1 = K_v \sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2}$$

$$\partial g \bar{h} = \left(\frac{1000kgm}{m^3} \right) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (0.2) = 1962 N/m^2$$

$$P_{atm} = 101337.3 N/m^2$$

$$P_{atm} + \partial g \bar{h} = \frac{101337,3N}{m^2} + \frac{1962 N}{m^2} = 103299,3 Pa$$

$$P_{atm} + \partial g \bar{h} = 103,30 Pa * \frac{1 psi}{6,8947 Kpa} = 14,98 psi$$

$$\sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2} = \sqrt{14,98 psi} = 3,87 psi^{\frac{1}{2}}$$

$$C_1 = K_V \sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2}$$

$$C_1 = 0,083 \frac{m^3}{min * psi^{\frac{1}{2}}} (3,87 psi^{\frac{1}{2}})$$

$$C_1 = 0,32 \frac{m^3}{min}$$

4.1.4 Calculo de τ_P

$$\tau_P = \frac{A}{C_2}$$

$$\tau_P = \frac{0,15 m^2}{0,32 \frac{m^3}{min}}$$

$$\tau_P = 0,468 \frac{min}{m} * 1m$$

$$\tau_P = 0,468 min$$

4.1.5 Calculo de K_P

$$K_P = \frac{1}{C_1}$$

$$K_p = \frac{1 \frac{m^3}{m}}{0,468 \frac{m^3}{m}}$$

$$K_p = 2,13$$

4.1.6 Cálculo de los periodos críticos

$$P_{cr1} = \frac{2\pi}{0,11} = 57,11$$

$$P_{cr2} = \frac{2\pi}{759,89} = 0,008$$

$$\text{Si } K_{cr} = 10 \text{ y } P_{cr} = 57,11$$

$$K_1 = 0,6K_{cr} = 6$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 28,55$$

$$T_d = 0,125P_{cr} = 7,138$$

4.1.7 Cálculo de la función de transferencia para el sistema

$$H(s) = \frac{\tau_i s K_p \tau_p s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}{\tau_p s \tau_i s + \tau_i s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}$$

$$H(s) = \frac{\frac{42,80 s^2 + 6s + 0,21}{s} * \frac{75,80}{9,8s + 1}}{1 + \frac{42,80 s^2 + 6s + 0,21}{s} * \frac{75,80}{9,8s + 1}}$$

$$H(s) = \frac{\frac{3244,24s^2 + 454,8s + 15,92}{9,8s^2 + s}}{1 + \frac{3244,24s^2 + 454,8s + 15,92}{9,8s^2 + s}}$$

$$H(s) = \frac{\frac{3244,24s^2 + 454,8s + 15,92}{9,8s^2 + s}}{\frac{3254,04s^2 + 455,8s + 15,92}{9,8s^2 + s}}$$

$$H(s) = \frac{3244,24s^2 + 454,8s + 15,92}{3254,04s^2 + 455,8s + 15,92}$$

4.2 Cálculo del control proporcional integral derivativo

Para obtener los valores de K_d , τ_i y τ_p se proponen los siguientes valores, para K_d se proponen los valores de $R_d = 0,7K\Omega$ y $C_d = 10\mu f$, para K_i , $R_i = 2K\Omega$ y $C_i = 10\mu f$ y para K_p , $R_{f2} = 120K\Omega$ y $R_3 = 12K\Omega$.

4.2.1 Cálculo de acción proporcional K_p

$$K_p = \frac{R_{f2}}{R_3} = \frac{120}{10} = 10$$

4.2.2 Cálculo de la acción integral K_i

$$\tau_i = \frac{1}{R_i C_i} = \frac{1}{0,2} = 0,050$$

4.2.3 Cálculo de acción derivativa K_d

$$\tau_d = R_d C_d = 0,7 * 0,10 = 0,07$$

4.3 Cálculo modelo para el agua de la función de transferencia con alimentación variable

La alimentación variable del líquido se realiza con la válvula parcialmente abierta lo que significa un valor de apertura de la válvula $K_v = 50\%$

Datos:

Tabla 2. Datos para el cálculo de la función de transferencia

Datos	Valor	Dimensiones
δ	1000	$\frac{kgm}{m^3}$
g	9,81	$\frac{m}{s^2}$
K_V	2,5	$\frac{m^3}{h}$
\bar{h}	0,40	m
Patm	101337.3	N/m^2

4.3.1 Cálculo del caudal máximo para la válvula q_{max}

$$q_{max} = vA_v$$

$$v = \sqrt{2gh_{max}}$$

$$v = \sqrt{2 \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (4,85m)} = 4,85 \frac{m}{s}$$

$$A_v = \pi r^2$$

$$A_v = 3.1416(0,01905m)^2$$

$$A_v = 0,00114 m^2$$

$$q_{max} = 0,0055 \frac{m^3}{s} = 332 \frac{lt}{min} = 87,71 \frac{gal}{min}$$

4.3.2 Cálculo del Área del reservorio

$$A = l * h$$

$$A = 0,75m * 0,20m$$

$$A = 0,15 m^2$$

4.3.3 Cálculo de la constante C_1 Se Utiliza los siguientes valores de operación:

$h = 0,20m$, $K_V = 50\% = 0.5$, P_2 se considera constante por lo que la consideramos $=0$

Con estas condiciones proseguimos a realizar los cálculos para C_1

$$C_1 = K_V \sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2}$$

$$\partial g \bar{h} = \left(\frac{1000 kgm}{m^3} \right) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (0.2) = 1962 N/m^2$$

$$P_{atm} = 101337.3 N/m^2$$

$$P_{atm} + \partial g \bar{h} = \frac{101337,3N}{m^2} + \frac{1962 N}{m^2} = 103299,3 Pa$$

$$P_{atm} + \partial g \bar{h} = 103,30 Pa * \frac{1 psi}{6,8947 Kpa} = 14,98 psi$$

$$\sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2} = \sqrt{14,98 psi} = 3,87 psi^{\frac{1}{2}}$$

$$C_1 = K_V \sqrt{P_{atm} + \partial g \bar{h} - P_2}$$

$$C_1 = 0,041 \frac{m^3}{min * psi^{\frac{1}{2}}} (3,87 psi^{\frac{1}{2}})$$

$$C_1 = 0,16 \frac{m^3}{min}$$

4.3.4 Cálculo de τ_P

$$\tau_P = \frac{A}{C_2}$$

$$\tau_P = \frac{0,15m^2}{0,16 \frac{m^3}{min}}$$

$$\tau_p = 0,93 \frac{min}{m} * 1m$$

$$\tau_p = 0,93 min$$

4.3.5 Cálculo de K_p

$$K_p = \frac{1}{C_1}$$

$$K_p = \frac{1 \frac{m^3}{m}}{0,93 \frac{m^3}{m}}$$

$$K_p = 1,075$$

4.3.6 Cálculo de los periodos críticos

$$P_{cr1} = \frac{2\pi}{0,11} = 57,11$$

$$P_{cr2} = \frac{2\pi}{759,89} = 0,008$$

$$Si K_{cr} = 10 y P_{cr} = 57,11$$

$$K_1 = 0,6K_{cr} = 6$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 28,55$$

$$T_d = 0,125P_{cr} = 7,138$$

4.3.7 Cálculo de la función de transferencia para el sistema

$$H(s) = \frac{\tau_i s K_p \tau_p s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}{\tau_p s \tau_i s + \tau_i s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}$$

$$H(s) = \frac{(6 + \frac{6}{28,55s} + 42,828s)(1,075)}{0,93s + (6 + \frac{6}{28,55s} + 42,828s)(1,075) + 1}$$

$$H(s) = \frac{(6,45 + \frac{6,45}{28,55s} + 46,04 s)}{(0,93s) + (6,45 + \frac{6,45}{28,55s} + 46,04 s) + 1}$$

$$H(s) = \frac{\frac{184,14s+6,45+1314,44s^2}{28,55s}}{0,93s + \frac{184,14s+6,45+1314,44s^2}{28,55s} + 1}$$

$$H(s) = \frac{\frac{184,14s+6,45+1314,44s^2}{28,55s}}{\frac{26,55s^2+184,14s^2+6,45+1314,44+28,55s}{28,55s}}$$

$$H(s) = \frac{\frac{184,14s+6,45+1314,44s^2}{28,55s}}{\frac{26,55s^2+1314,44 s^2+6,45+184,14s+28,55s}{28,55s}}$$

$$H(s) = \frac{184,14s + 6,45 + 1314,44s^2}{1345s^2 + 212,70s + 6,45}$$

$$H(s) = \frac{1314,44s^2 + 184,14s + 6,45}{1345s^2 + 212,70s + 6,45}$$

Los valores de las ganancias K_p, τ_i, τ_d del control PID son los calculados anteriormente, debidos a que no se encuentran en función del caudal.

4.4 Resultados

4.4.1 Resultados del modelo matemático para agua con alimentación continua

Tabla 3. Resultados del modelo matemático para agua con alimentación continua

Nomenclatura	Valor	Unidades
H_2O	Agua	
Av	0,00114	m^2
q_{max}	87,71	$\frac{gal}{min}$
A	0,15	m^2
C_1	0,32	$\frac{m^2}{min}$
τ	0,468	min
K_p	2,13	
$G_c(s)$	$\frac{1222.74s^2 + 171,3s + 6}{28,55s}$	
$H(s)$	$\frac{2604s^2 + 364,87s + 12,78}{2617s^2 + 393,42s + 12,78}$	
Pcr_1	57,11	
Pcr_2	0,008	
K_p	10	
τ_i	0,050	
τ_d	0,07	

4.4.1.1 Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación continua

Tabla 4. Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación continua

$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$
1	0.03	41	1.62	81	0.68	121	1.12	161	0.99	201	0.97	241	1.04
2	0.06	42	1.62	82	0.67	122	1.13	162	0.98	202	0.97	242	1.04
3	0.10	43	1.61	83	0.66	123	1.15	163	0.97	203	0.98	243	1.03
4	0.14	44	1.60	84	0.65	124	1.16	164	0.96	204	0.99	244	1.03
5	0.18	45	1.59	85	0.65	125	1.17	165	0.95	205	0.99	245	1.03
6	0.22	46	1.58	86	0.65	126	1.17	166	0.94	206	1.00	246	1.02
7	0.27	47	1.57	87	0.65	127	1.18	167	0.93	207	1.01	247	1.02
8	0.32	48	1.55	88	0.65	128	1.19	168	0.93	208	1.01	248	1.02
9	0.37	49	1.53	89	0.65	129	1.19	169	0.92	209	1.02	249	1.01
10	0.43	50	1.51	90	0.65	130	1.20	170	0.91	210	1.02	250	1.01
11	0.48	51	1.48	91	0.66	131	1.20	171	0.91	211	1.03	251	1.01
12	0.54	52	1.46	92	0.66	132	1.20	172	0.90	212	1.03	252	1.00
13	0.59	53	1.43	93	0.67	133	1.20	173	0.90	213	1.04	253	1.00
14	0.65	54	1.40	94	0.68	134	1.20	174	0.89	214	1.04	254	1.00
15	0.71	55	1.38	95	0.69	135	1.20	175	0.89	215	1.04	255	0.99
16	0.77	56	1.34	96	0.70	136	1.20	176	0.89	216	1.05	256	0.99
17	0.82	57	1.31	97	0.72	137	1.20	177	0.89	217	1.05	257	0.99
18	0.88	58	1.28	98	0.73	138	1.20	178	0.88	218	1.05	258	0.98
19	0.94	59	1.25	99	0.74	139	1.19	179	0.88	219	1.06	259	0.98
20	0.99	60	1.22	100	0.76	140	1.19	180	0.88	220	1.06	260	0.98
21	1.05	61	1.18	101	0.78	141	1.18	181	0.88	221	1.06	261	0.98
22	1.10	62	1.15	102	0.79	142	1.17	182	0.88	222	1.06	262	0.97
23	1.15	63	1.12	103	0.81	143	1.17	183	0.88	223	1.07	263	0.97
24	1.20	64	1.08	104	0.83	144	1.16	184	0.89	224	1.07	264	0.97
25	1.24	65	1.05	105	0.85	145	1.15	185	0.89	225	1.07	265	0.97
26	1.29	66	1.02	106	0.87	146	1.14	186	0.89	226	1.07	266	0.97
27	1.33	67	0.99	107	0.89	147	1.13	187	0.89	227	1.07	267	0.96
28	1.37	68	0.96	108	0.90	148	1.12	188	0.90	228	1.07	268	0.96
29	1.41	69	0.93	109	0.92	149	1.11	189	0.90	229	1.07	269	0.96
30	1.44	70	0.90	110	0.94	150	1.10	190	0.91	230	1.07	270	0.96
31	1.47	71	0.87	111	0.96	151	1.09	191	0.91	231	1.06	271	0.96
32	1.50	72	0.85	112	0.98	152	1.08	192	0.92	232	1.06	272	0.96
33	1.53	73	0.82	113	1.00	153	1.07	193	0.92	233	1.06	273	0.96
34	1.55	74	0.80	114	1.02	154	1.06	194	0.93	234	1.06	274	0.96
35	1.57	75	0.78	115	1.03	155	1.05	195	0.93	235	1.06	275	0.96
36	1.58	76	0.76	116	1.05	156	1.04	196	0.94	236	1.06	276	0.96
37	1.60	77	0.74	117	1.07	157	1.03	197	0.94	237	1.05	277	0.96
38	1.61	78	0.72	118	1.08	158	1.02	198	0.95	238	1.05	278	0.96
39	1.61	79	0.70	119	1.10	159	1.01	199	0.96	239	1.05	279	0.96
40	1.62	80	0.69	120	1.11	160	1.00	200	0.96	240	1.04	280	0.97

4.4.1.2 Resultados de la variable nivel para agua con alimentación continua

Tabla 5. Resultados del variable nivel para agua con alimentación continúa

$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm
1	0.00	41	13.91	81	15.95
2	0.00	42	14.20	82	16.22
3	0.50	43	14.49	83	16.00
4	0.96	44	14.78	84	16.27
5	0.05	45	15.06	85	16.05
6	0.39	46	15.34	86	15.82
7	0.63	47	15.62	87	16.10
8	0.78	48	15.90	88	15.87
9	0.86	49	16.18	89	16.15
10	0.88	50	16.45	90	15.92
11	0.83	51	16.73	91	16.20
12	4.27	52	17.00	92	15.97
13	4.66	53	17.26	93	16.25
14	5.04	54	17.03	94	16.02
15	5.41	55	16.80	95	15.80
16	5.78	56	16.57	96	16.08
17	6.14	57	16.34	97	15.85
18	6.51	58	16.12	98	16.13
19	6.86	59	15.89	99	15.90
20	7.22	60	16.17	100	16.18
21	7.56	61	15.94	101	15.95
22	7.91	62	16.22	102	16.23
23	8.25	63	15.99	103	16.00
24	8.59	64	16.27	104	15.78
25	8.93	65	16.04	105	16.06
26	9.26	66	15.82	106	15.83
27	9.59	67	16.09	107	16.11
28	9.91	68	15.87	108	15.88
29	10.24	69	16.14	109	16.16
30	10.56	70	15.92	110	15.93
31	10.88	71	16.19	111	16.21
32	11.19	72	15.97	112	15.98
33	11.50	73	16.24	113	16.26
34	11.81	74	16.02	114	16.03
35	12.12	75	15.79	115	15.81
36	12.42	76	16.07	116	16.09
37	12.73	77	15.85	117	15.86
38	13.03	78	16.12	118	16.14
39	13.32	79	15.90	119	15.91
40	13.62	80	16.17	120	16.19

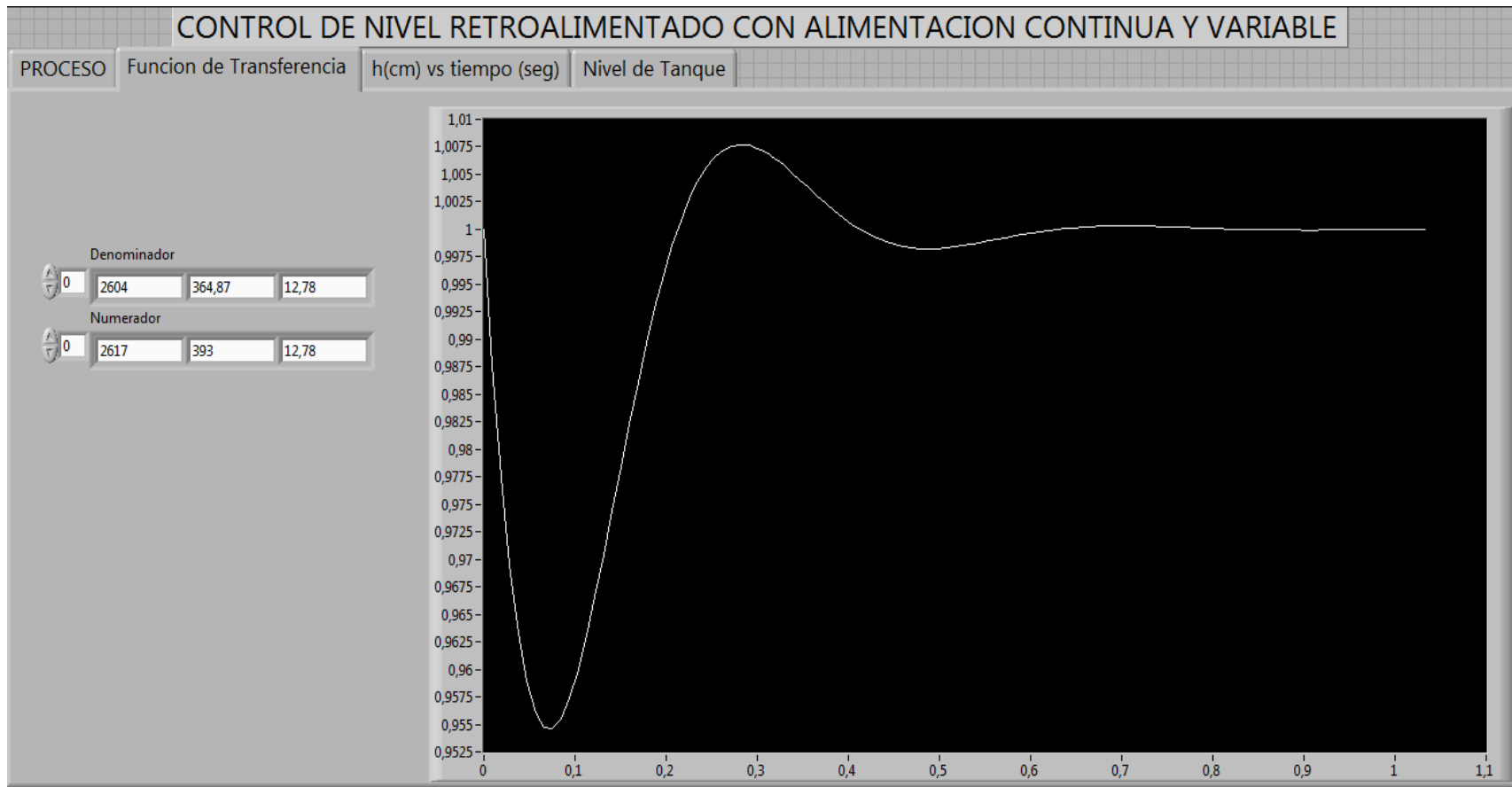


Gráfico 1. $H(s)=f(t(seg))$ para agua con alimentación continua

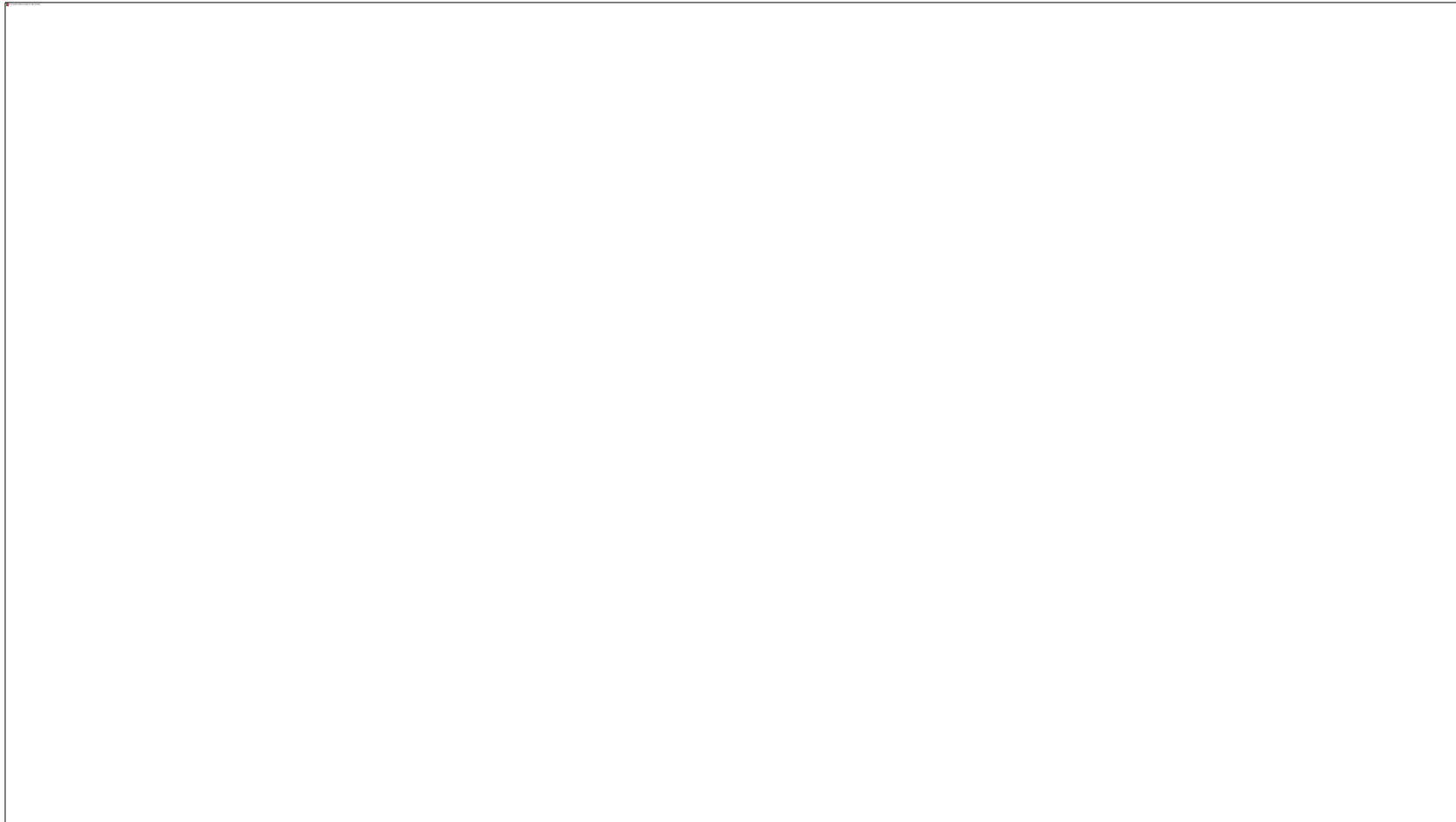


Gráfico 2. $h, \text{cm} = f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación continua

4.4.2 Resultados del modelo matemático para el alcohol con alimentación continúa

Tabla 6. Resultados del modelo matemático con alimentación continúa para alcohol

Nomenclatura	Valor	Unidades
$C_nH_{2n+1}OH$	Alcohol	
Av	0,00114	m^2
q_{max}	87,71	$\frac{gal}{min}$
A	0,15	m^2
C_1	0,29	$\frac{m^3}{min}$
τ	0,41	min
K_p	1,8	$\frac{lt}{m. min}$
$G_c(s)$	$\frac{1185s^2 + 166,5s + 6}{27,67s}$	
$H(s)$	$\frac{2532,24s^2 + 358,2s + 10,45}{3546,02s^2 + 367,04s + 10,45}$	
Pcr_1	55,35	
Pcr_2	0,006	
K_p	10	
τ_i	0,050	
τ_d	0,07	

4.4.2.1 Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación continua

Tabla 7. Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación continua

$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$
1	0.03	41	1.59	81	0.73	121	1.07	161	1.02	201	0.95	241	1.04
2	0.06	42	1.59	82	0.72	122	1.09	162	1.01	202	0.96	242	1.04
3	0.09	43	1.59	83	0.71	123	1.10	163	1.00	203	0.96	243	1.04
4	0.13	44	1.59	84	0.70	124	1.11	164	1.00	204	0.97	244	1.04
5	0.17	45	1.58	85	0.70	125	1.12	165	0.99	205	0.97	245	1.03
6	0.22	46	1.57	86	0.69	126	1.13	166	0.98	206	0.98	246	1.03
7	0.26	47	1.56	87	0.69	127	1.14	167	0.97	207	0.98	247	1.03
8	0.31	48	1.54	88	0.68	128	1.14	168	0.96	208	0.99	248	1.03
9	0.36	49	1.53	89	0.68	129	1.15	169	0.96	209	0.99	249	1.02
10	0.41	50	1.51	90	0.68	130	1.16	170	0.95	210	1.00	250	1.02
11	0.46	51	1.49	91	0.68	131	1.16	171	0.95	211	1.00	251	1.02
12	0.52	52	1.47	92	0.69	132	1.17	172	0.94	212	1.01	252	1.02
13	0.57	53	1.45	93	0.69	133	1.17	173	0.93	213	1.01	253	1.01
14	0.63	54	1.42	94	0.70	134	1.17	174	0.93	214	1.01	254	1.01
15	0.68	55	1.40	95	0.70	135	1.18	175	0.93	215	1.02	255	1.01
16	0.74	56	1.37	96	0.71	136	1.18	176	0.92	216	1.02	256	1.01
17	0.80	57	1.34	97	0.72	137	1.18	177	0.92	217	1.03	257	1.00
18	0.85	58	1.31	98	0.73	138	1.18	178	0.91	218	1.03	258	1.00
19	0.91	59	1.28	99	0.74	139	1.17	179	0.91	219	1.03	259	1.00
20	0.96	60	1.25	100	0.76	140	1.17	180	0.91	220	1.04	260	1.00
21	1.01	61	1.22	101	0.77	141	1.17	181	0.91	221	1.04	261	0.99
22	1.06	62	1.19	102	0.78	142	1.17	182	0.91	222	1.04	262	0.99
23	1.11	63	1.16	103	0.80	143	1.16	183	0.91	223	1.04	263	0.99
24	1.16	64	1.13	104	0.81	144	1.16	184	0.91	224	1.05	264	0.99
25	1.20	65	1.10	105	0.83	145	1.15	185	0.91	225	1.05	265	0.99
26	1.25	66	1.07	106	0.84	146	1.15	186	0.91	226	1.05	266	0.98
27	1.29	67	1.04	107	0.86	147	1.14	187	0.91	227	1.05	267	0.98
28	1.33	68	1.01	108	0.87	148	1.13	188	0.91	228	1.05	268	0.98
29	1.37	69	0.99	109	0.89	149	1.12	189	0.91	229	1.05	269	0.98
30	1.40	70	0.96	110	0.91	150	1.12	190	0.91	230	1.05	270	0.98
31	1.43	71	0.93	111	0.92	151	1.11	191	0.92	231	1.05	271	0.98
32	1.46	72	0.91	112	0.94	152	1.10	192	0.92	232	1.05	272	0.98
33	1.49	73	0.88	113	0.96	153	1.09	193	0.92	233	1.05	273	0.97
34	1.51	74	0.86	114	0.97	154	1.08	194	0.92	234	1.05	274	0.97
35	1.53	75	0.84	115	0.99	155	1.08	195	0.93	235	1.05	275	0.97
36	1.55	76	0.82	116	1.00	156	1.07	196	0.93	236	1.05	276	0.97
37	1.56	77	0.80	117	1.02	157	1.06	197	0.94	237	1.05	277	0.97
38	1.57	78	0.78	118	1.03	158	1.05	198	0.94	238	1.05	278	0.97
39	1.58	79	0.76	119	1.05	159	1.04	199	0.94	239	1.05	279	0.97
40	1.59	80	0.75	120	1.06	160	1.03	200	0.95	240	1.04	280	0.97

4.4.2.2 Resultados de la variable nivel para alcohol con alimentación continua

Tabla 8. Resultados del variable nivel para alcohol con alimentación continúa

$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm
1	0.00	41	13.91	81	17.92
2	0.00	42	14.20	82	18.18
3	0.50	43	14.49	83	17.94
4	0.96	44	14.78	84	17.70
5	1.41	45	15.06	85	17.47
6	1.84	46	15.34	86	17.23
7	2.26	47	15.62	87	17.00
8	2.68	48	15.90	88	17.27
9	3.09	49	16.18	89	17.03
10	3.49	50	16.45	90	16.80
11	3.88	51	16.73	91	17.07
12	4.27	52	17.00	92	16.84
13	4.66	53	17.26	93	17.11
14	5.04	54	17.53	94	16.88
15	5.41	55	17.80	95	17.15
16	5.78	56	18.06	96	16.92
17	6.14	57	18.32	97	16.69
18	6.51	58	18.58	98	16.46
19	6.86	59	18.84	99	16.23
20	7.22	60	19.10	100	16.00
21	7.56	61	19.35	101	15.78
22	7.91	62	19.60	102	16.06
23	8.25	63	19.86	103	15.83
24	8.59	64	20.11	104	16.11
25	8.93	65	19.85	105	15.88
26	9.26	66	20.10	106	16.16
27	9.59	67	19.85	107	15.93
28	9.91	68	20.10	108	16.21
29	10.24	69	19.85	109	15.98
30	10.56	70	20.10	110	16.26
31	10.88	71	19.85	111	16.03
32	11.19	72	19.60	112	15.81
33	11.50	73	19.35	113	16.08
34	11.81	74	19.10	114	15.86
35	12.12	75	18.86	115	16.14
36	12.42	76	18.62	116	15.91
37	12.73	77	18.37	117	16.19
38	13.03	78	18.13	118	15.96
39	13.32	79	17.89	119	16.24
40	13.62	80	18.16	120	16.01

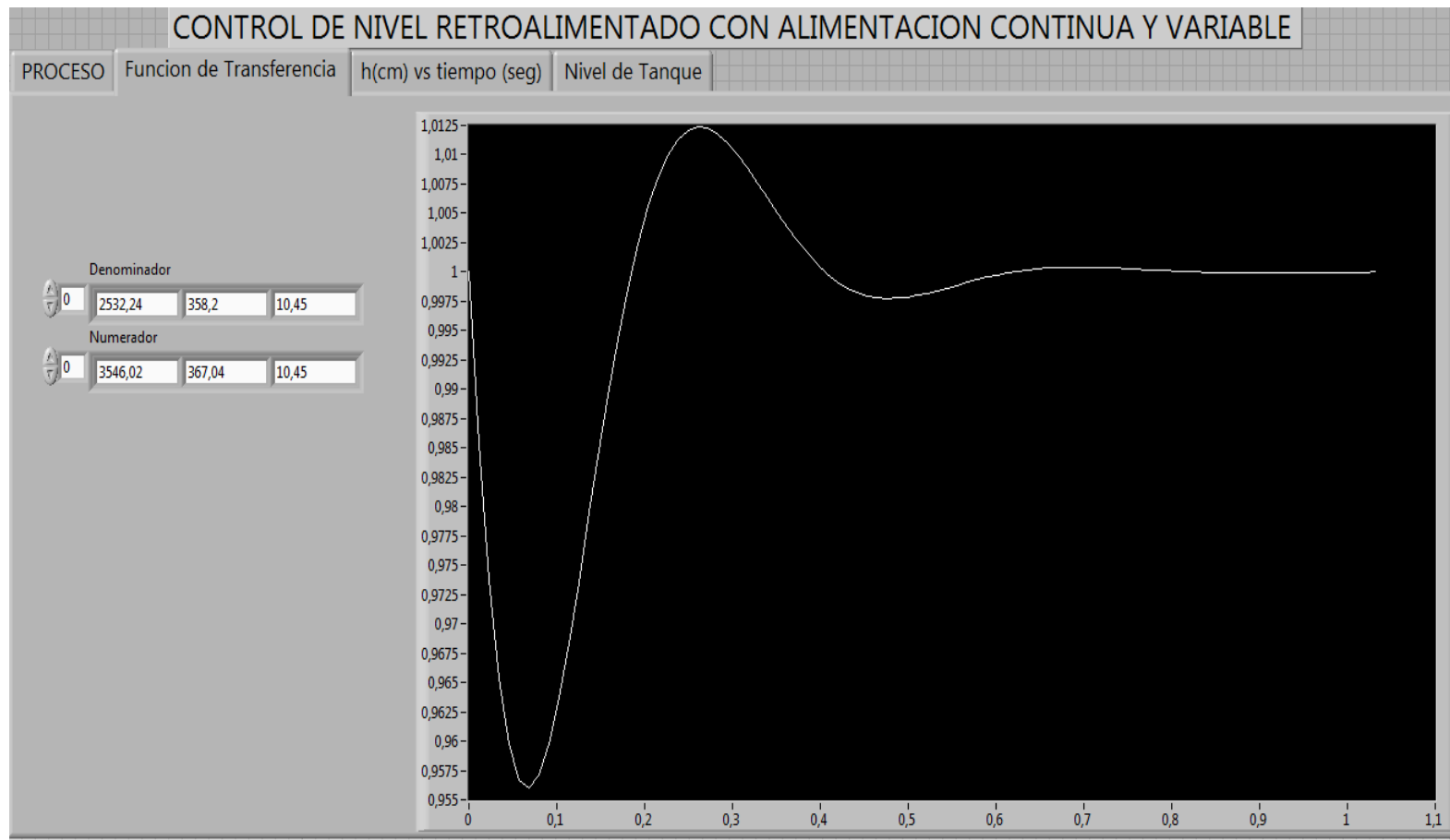


Gráfico 3. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación continua

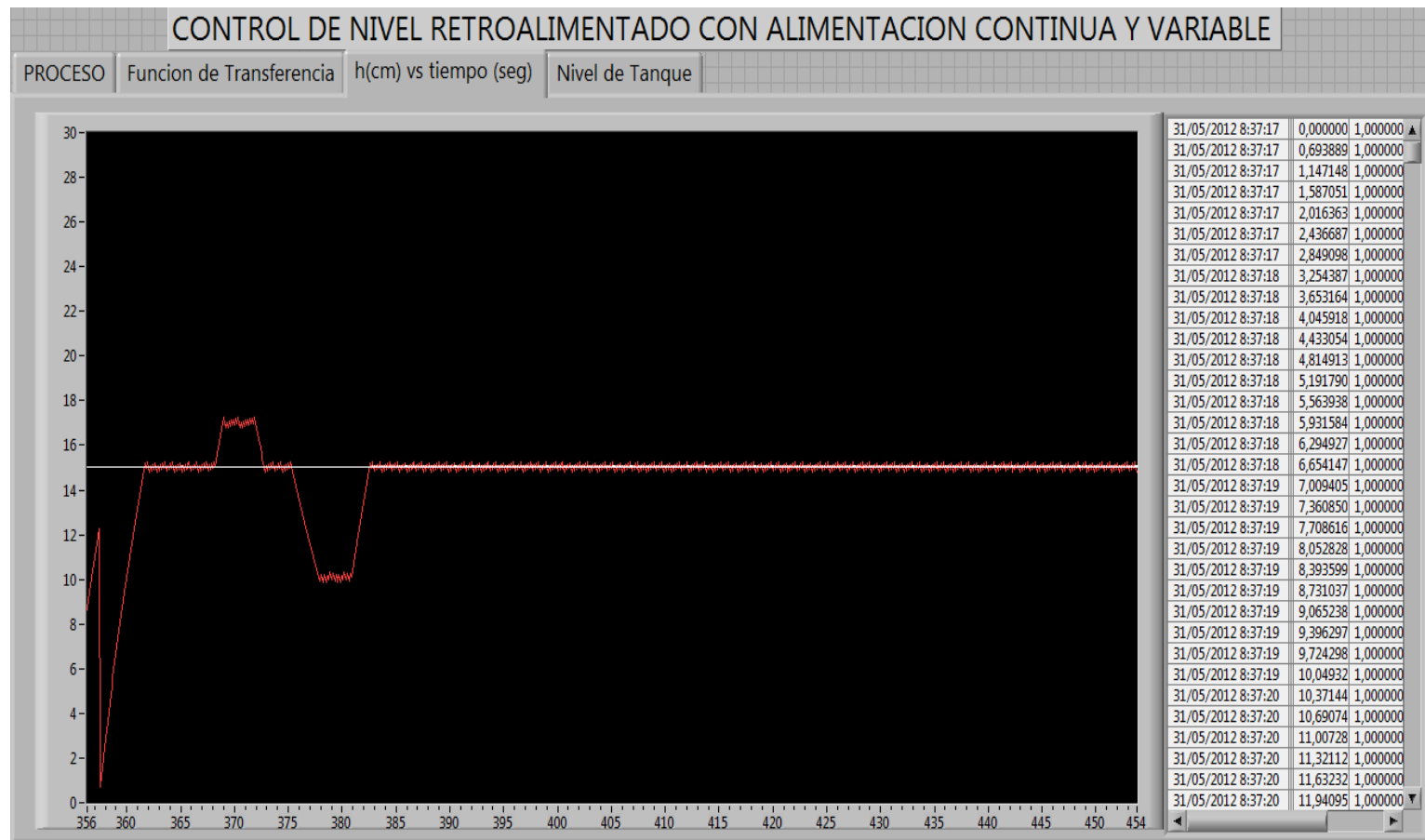


Gráfico 4. $h, \text{cm} = f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación continua

4.4.3 Resultados del modelo matemático para agua con alimentación variable

Tabla 9. Resultados del modelo matemático con alimentación variable para agua

Nomenclatura	Valor	Unidades
H_2O	Agua	
Av	0,00114	m^2
q_{max}	87,71	$\frac{gal}{min}$
A	0,15	m^2
C_1	0,16	$\frac{m^2}{min}$
τ	0,93	min
K_p	1,075	$\frac{lt}{m.min}$
$G_c(s)$	$\frac{1222.74s^2 + 171,3s + 6}{28,55s}$	
$H(s)$	$\frac{1314,44s^2 + 184,14s + 6,45}{1345s^2 + 212,95s + 6,45}$	
Pcr_1	57,11	
Pcr_2	0,008	
K_p	10	
τ_i	0,050	
τ_d	0,07	

4.4.3.1 Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación variable

Tabla 10. Resultados de la función de transferencia para agua con alimentación variable

$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$
1	0.03	41	1.62	81	0.68	121	1.12	161	0.99	201	0.97	241	1.04
2	0.06	42	1.62	82	0.67	122	1.13	162	0.98	202	0.97	242	1.04
3	0.10	43	1.61	83	0.66	123	1.15	163	0.97	203	0.98	243	1.03
4	0.14	44	1.60	84	0.65	124	1.16	164	0.96	204	0.99	244	1.03
5	0.18	45	1.59	85	0.65	125	1.17	165	0.95	205	0.99	245	1.03
6	0.22	46	1.58	86	0.65	126	1.17	166	0.94	206	1.00	246	1.02
7	0.27	47	1.57	87	0.65	127	1.18	167	0.93	207	1.01	247	1.02
8	0.32	48	1.55	88	0.65	128	1.19	168	0.93	208	1.01	248	1.02
9	0.37	49	1.53	89	0.65	129	1.19	169	0.92	209	1.02	249	1.01
10	0.43	50	1.51	90	0.65	130	1.20	170	0.91	210	1.02	250	1.01
11	0.48	51	1.48	91	0.66	131	1.20	171	0.91	211	1.03	251	1.01
12	0.54	52	1.46	92	0.66	132	1.20	172	0.90	212	1.03	252	1.00
13	0.59	53	1.43	93	0.67	133	1.20	173	0.90	213	1.04	253	1.00
14	0.65	54	1.40	94	0.68	134	1.20	174	0.89	214	1.04	254	1.00
15	0.71	55	1.38	95	0.69	135	1.20	175	0.89	215	1.04	255	0.99
16	0.77	56	1.34	96	0.70	136	1.20	176	0.89	216	1.05	256	0.99
17	0.82	57	1.31	97	0.72	137	1.20	177	0.89	217	1.05	257	0.99
18	0.88	58	1.28	98	0.73	138	1.20	178	0.88	218	1.05	258	0.98
19	0.94	59	1.25	99	0.74	139	1.19	179	0.88	219	1.06	259	0.98
20	0.99	60	1.22	100	0.76	140	1.19	180	0.88	220	1.06	260	0.98
21	1.05	61	1.18	101	0.78	141	1.18	181	0.88	221	1.06	261	0.98
22	1.10	62	1.15	102	0.79	142	1.17	182	0.88	222	1.06	262	0.97
23	1.15	63	1.12	103	0.81	143	1.17	183	0.88	223	1.07	263	0.97
24	1.20	64	1.08	104	0.83	144	1.16	184	0.89	224	1.07	264	0.97
25	1.24	65	1.05	105	0.85	145	1.15	185	0.89	225	1.07	265	0.97
26	1.29	66	1.02	106	0.87	146	1.14	186	0.89	226	1.07	266	0.97
27	1.33	67	0.99	107	0.89	147	1.13	187	0.89	227	1.07	267	0.96
28	1.37	68	0.96	108	0.90	148	1.12	188	0.90	228	1.07	268	0.96
29	1.41	69	0.93	109	0.92	149	1.11	189	0.90	229	1.07	269	0.96
30	1.44	70	0.90	110	0.94	150	1.10	190	0.91	230	1.07	270	0.96
31	1.47	71	0.87	111	0.96	151	1.09	191	0.91	231	1.06	271	0.96
32	1.50	72	0.85	112	0.98	152	1.08	192	0.92	232	1.06	272	0.96
33	1.53	73	0.82	113	1.00	153	1.07	193	0.92	233	1.06	273	0.96
34	1.55	74	0.80	114	1.02	154	1.06	194	0.93	234	1.06	274	0.96
35	1.57	75	0.78	115	1.03	155	1.05	195	0.93	235	1.06	275	0.96
36	1.58	76	0.76	116	1.05	156	1.04	196	0.94	236	1.06	276	0.96
37	1.60	77	0.74	117	1.07	157	1.03	197	0.94	237	1.05	277	0.96
38	1.61	78	0.72	118	1.08	158	1.02	198	0.95	238	1.05	278	0.96
39	1.61	79	0.70	119	1.10	159	1.01	199	0.96	239	1.05	279	0.96
40	1.62	80	0.69	120	1.11	160	1.00	200	0.96	240	1.04	280	0.97

4.4.3.2 Resultados de la variable nivel para agua con alimentación variable

Tabla 11. Resultados del variable nivel para agua con alimentación variable

$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm
1	0.00	41	13.91	81	24.13
2	0.00	42	14.20	82	23.85
3	0.50	43	14.49	83	23.58
4	0.96	44	14.78	84	23.31
5	1.41	45	15.06	85	23.04
6	1.84	46	15.34	86	22.77
7	2.26	47	15.62	87	22.50
8	2.68	48	15.90	88	22.23
9	3.09	49	16.18	89	21.97
10	3.49	50	16.45	90	21.71
11	3.88	51	16.73	91	21.44
12	4.27	52	17.00	92	21.18
13	4.66	53	17.26	93	20.93
14	5.04	54	17.53	94	20.67
15	5.41	55	17.80	95	20.41
16	5.78	56	18.06	96	20.16
17	6.14	57	18.32	97	19.91
18	6.51	58	18.58	98	19.66
19	6.86	59	18.84	99	19.41
20	7.22	60	19.10	100	19.16
21	7.56	61	19.35	101	18.92
22	7.91	62	19.60	102	18.67
23	8.25	63	19.86	103	18.43
24	8.59	64	20.11	104	18.19
25	8.93	65	20.35	105	17.95
26	9.26	66	20.60	106	17.71
27	9.59	67	20.85	107	17.48
28	9.91	68	21.09	108	17.24
29	10.24	69	21.33	109	17.01
30	10.56	70	21.57	110	16.78
31	10.88	71	21.81	111	16.55
32	11.19	72	22.05	112	16.32
33	11.50	73	22.29	113	16.09
34	11.81	74	22.52	114	15.87
35	12.12	75	22.76	115	16.14
36	12.42	76	22.99	116	15.92
37	12.73	77	23.22	117	16.19
38	13.03	78	23.45	118	15.97
39	13.32	79	23.68	119	16.24
40	13.62	80	23.90	120	16.02

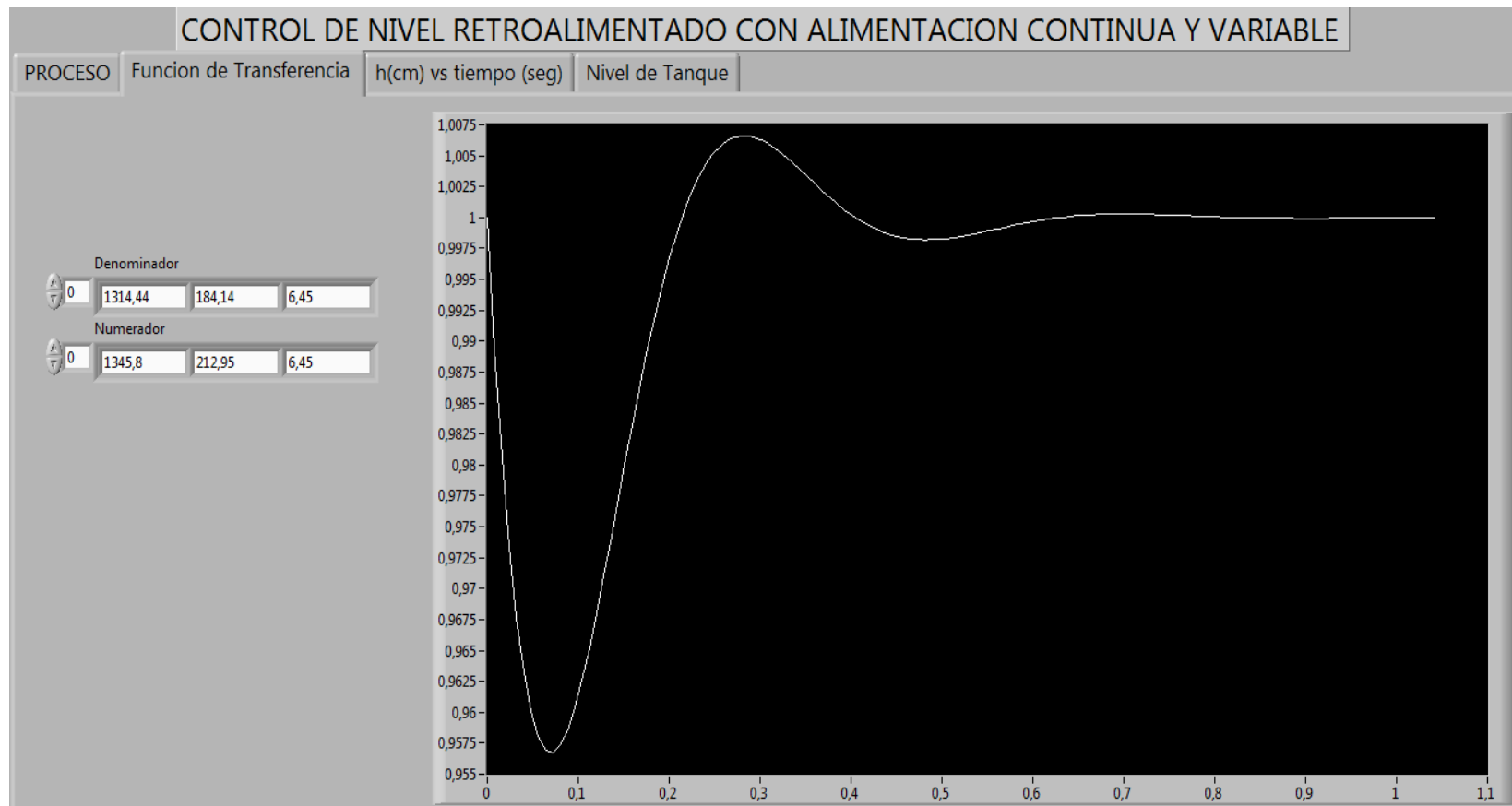


Gráfico 5. $H(s)=f(t(seg))$ para agua con alimentación variable



Gráfico 6. $h, \text{cm} = f(t(\text{seg}))$ para agua con alimentación variable

4.4.4 Resultados del modelo matemático para el alcohol con alimentación variable

Tabla12. Resultados del modelo matemático con alimentación variable para alcohol

Nomenclatura	Valor	Unidades
$C - H - OH$	Alcohol	
Av	0,00114	m^2
q_{max}	87,71	$\frac{gal}{min}$
A	0,15	m^2
C_1	0,14	$\frac{m^2}{min}$
τ	0,90	min
K_p	1,04	$\frac{lt}{m \cdot min}$
$G_c(s)$	$\frac{1185s^2 + 166,5s + 6}{27,67s}$	
$H(s)$	$\frac{1289,6s^2 + 175,6s + 5,72}{1296,01 + 187,1s + 5,72}$	
Pcr_1	55,35	
Pcr_2	0,006	
K_p	10	
τ_i	0,50	
τ_d	0,07	

4.4.4.1 Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación variable

Tabla 13. Resultados de la función de transferencia para alcohol con alimentación variable

$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$	$t_{(seg)}$	$H(s)$
1	0.03	41	1.59	81	0.73	121	1.07	161	1.02	201	0.95	241	1.04
2	0.06	42	1.59	82	0.72	122	1.09	162	1.01	202	0.96	242	1.04
3	0.09	43	1.59	83	0.71	123	1.10	163	1.00	203	0.96	243	1.04
4	0.13	44	1.59	84	0.70	124	1.11	164	1.00	204	0.97	244	1.04
5	0.17	45	1.58	85	0.70	125	1.12	165	0.99	205	0.97	245	1.03
6	0.22	46	1.57	86	0.69	126	1.13	166	0.98	206	0.98	246	1.03
7	0.26	47	1.56	87	0.69	127	1.14	167	0.97	207	0.98	247	1.03
8	0.31	48	1.54	88	0.68	128	1.14	168	0.96	208	0.99	248	1.03
9	0.36	49	1.53	89	0.68	129	1.15	169	0.96	209	0.99	249	1.02
10	0.41	50	1.51	90	0.68	130	1.16	170	0.95	210	1.00	250	1.02
11	0.46	51	1.49	91	0.68	131	1.16	171	0.95	211	1.00	251	1.02
12	0.52	52	1.47	92	0.69	132	1.17	172	0.94	212	1.01	252	1.02
13	0.57	53	1.45	93	0.69	133	1.17	173	0.93	213	1.01	253	1.01
14	0.63	54	1.42	94	0.70	134	1.17	174	0.93	214	1.01	254	1.01
15	0.68	55	1.40	95	0.70	135	1.18	175	0.93	215	1.02	255	1.01
16	0.74	56	1.37	96	0.71	136	1.18	176	0.92	216	1.02	256	1.01
17	0.80	57	1.34	97	0.72	137	1.18	177	0.92	217	1.03	257	1.00
18	0.85	58	1.31	98	0.73	138	1.18	178	0.91	218	1.03	258	1.00
19	0.91	59	1.28	99	0.74	139	1.17	179	0.91	219	1.03	259	1.00
20	0.96	60	1.25	100	0.76	140	1.17	180	0.91	220	1.04	260	1.00
21	1.01	61	1.22	101	0.77	141	1.17	181	0.91	221	1.04	261	0.99
22	1.06	62	1.19	102	0.78	142	1.17	182	0.91	222	1.04	262	0.99
23	1.11	63	1.16	103	0.80	143	1.16	183	0.91	223	1.04	263	0.99
24	1.16	64	1.13	104	0.81	144	1.16	184	0.91	224	1.05	264	0.99
25	1.20	65	1.10	105	0.83	145	1.15	185	0.91	225	1.05	265	0.99
26	1.25	66	1.07	106	0.84	146	1.15	186	0.91	226	1.05	266	0.98
27	1.29	67	1.04	107	0.86	147	1.14	187	0.91	227	1.05	267	0.98
28	1.33	68	1.01	108	0.87	148	1.13	188	0.91	228	1.05	268	0.98
29	1.37	69	0.99	109	0.89	149	1.12	189	0.91	229	1.05	269	0.98
30	1.40	70	0.96	110	0.91	150	1.12	190	0.91	230	1.05	270	0.98
31	1.43	71	0.93	111	0.92	151	1.11	191	0.92	231	1.05	271	0.98
32	1.46	72	0.91	112	0.94	152	1.10	192	0.92	232	1.05	272	0.98
33	1.49	73	0.88	113	0.96	153	1.09	193	0.92	233	1.05	273	0.97
34	1.51	74	0.86	114	0.97	154	1.08	194	0.92	234	1.05	274	0.97
35	1.53	75	0.84	115	0.99	155	1.08	195	0.93	235	1.05	275	0.97
36	1.55	76	0.82	116	1.00	156	1.07	196	0.93	236	1.05	276	0.97
37	1.56	77	0.80	117	1.02	157	1.06	197	0.94	237	1.05	277	0.97
38	1.57	78	0.78	118	1.03	158	1.05	198	0.94	238	1.05	278	0.97
39	1.58	79	0.76	119	1.05	159	1.04	199	0.94	239	1.05	279	0.97
40	1.59	80	0.75	120	1.06	160	1.03	200	0.95	240	1.04	280	0.97

4.4.4.2 Resultados de la variable nivel para alcohol con alimentación variable

Tabla 14. Resultados del variable nivel para alcohol con alimentación variable

$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm	$t_{(seg)}$	h, cm
1	0.00	41	13.91	81	23.63
2	0.00	42	14.20	82	23.36
3	0.50	43	14.49	83	23.09
4	0.96	44	14.78	84	22.82
5	1.41	45	15.06	85	22.55
6	1.84	46	15.34	86	22.28
7	2.26	47	15.62	87	22.02
8	2.68	48	15.90	88	21.75
9	3.09	49	16.18	89	21.49
10	3.49	50	16.45	90	21.23
11	3.88	51	16.73	91	20.97
12	4.27	52	17.00	92	20.72
13	4.66	53	17.26	93	20.46
14	5.04	54	17.53	94	20.21
15	5.41	55	17.80	95	19.95
16	5.78	56	18.06	96	19.70
17	6.14	57	18.32	97	19.46
18	6.51	58	18.58	98	19.21
19	6.86	59	18.84	99	18.96
20	7.22	60	19.10	100	18.72
21	7.56	61	19.35	101	18.47
22	7.91	62	19.60	102	18.23
23	8.25	63	19.86	103	17.99
24	8.59	64	20.11	104	17.76
25	8.93	65	20.35	105	17.52
26	9.26	66	20.60	106	17.28
27	9.59	67	20.85	107	17.05
28	9.91	68	21.09	108	16.82
29	10.24	69	21.33	109	16.59
30	10.56	70	21.57	110	16.36
31	10.88	71	21.81	111	16.13
32	11.19	72	22.05	112	15.91
33	11.50	73	22.29	113	16.18
34	11.81	74	22.52	114	15.96
35	12.12	75	22.76	115	16.23
36	12.42	76	22.99	116	16.01
37	12.73	77	23.22	117	15.78
38	13.03	78	23.45	118	16.06
39	13.32	79	23.68	119	15.84
40	13.62	80	23.90	120	16.11

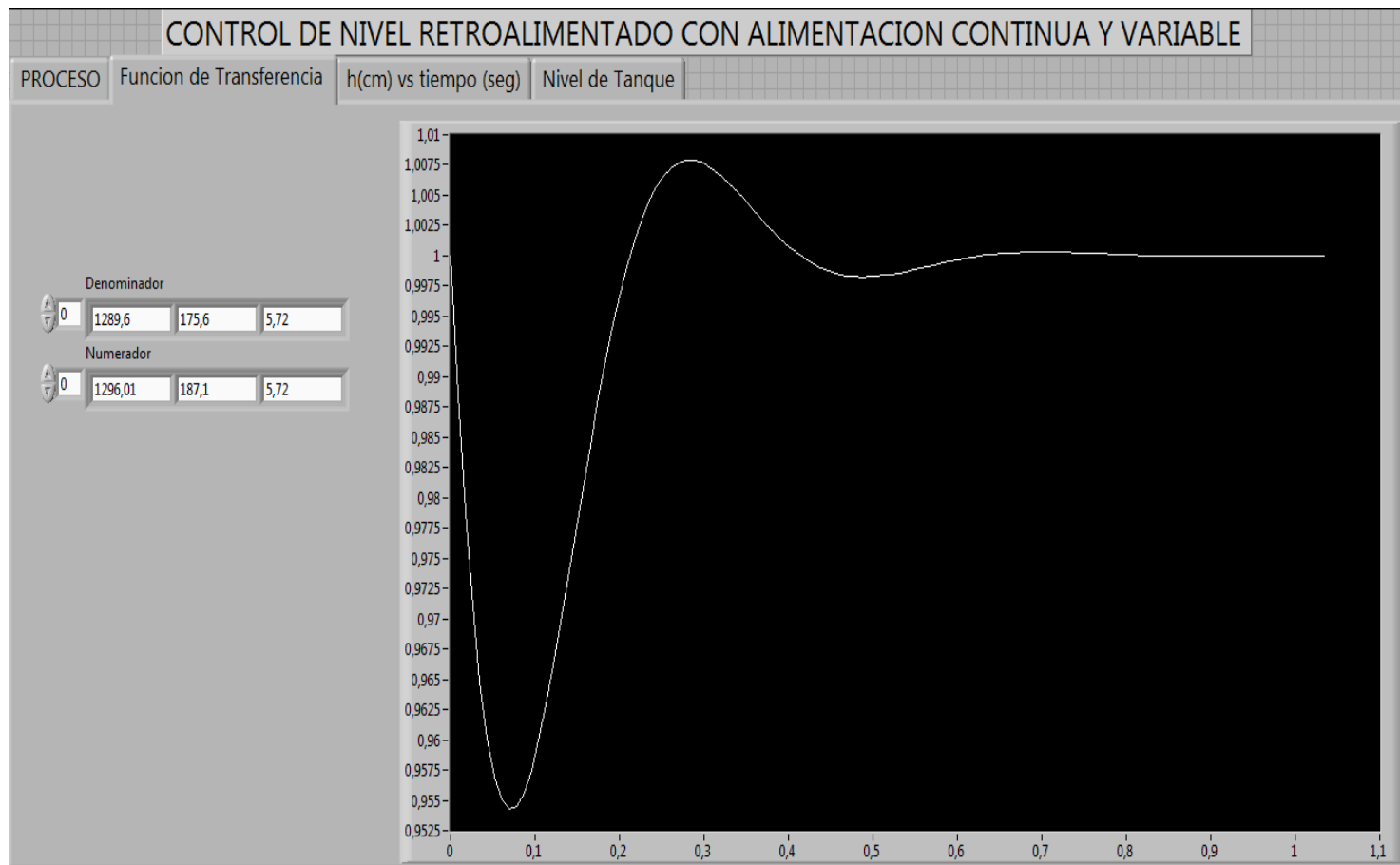


Gráfico 7. $H(s)=f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación variable

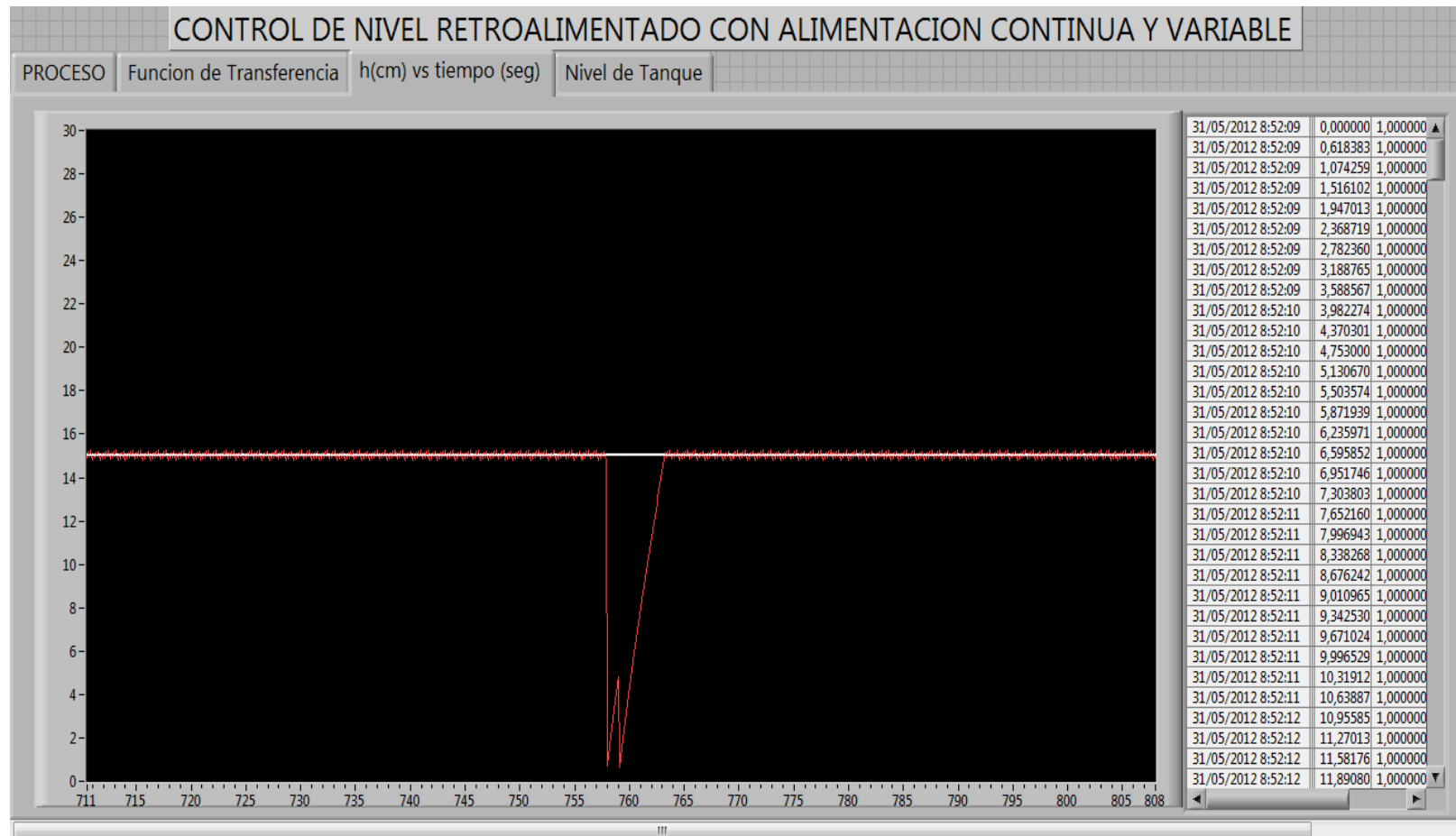


Gráfico 8. $h, \text{cm} = f(t(\text{seg}))$ para alcohol con alimentación variable

5. DISCUSIÓN

- Para el desarrollo de la programación del sistema de control y simulación se requiere conocimientos de programación grafica en el software labview esto permite realizar conexiones adecuadas en cada herramienta virtual. La programación se vuelve compleja para los parámetros de entrada y salida de señales de los instrumentos de medición y control, si estas señales son erróneas los instrumentos presentan problemas de funcionamiento afectando al sistema de control.
- En el tanque donde se controla el nivel del líquido existe una altura de cinco centímetros de las conexiones que corresponden a las tuberías de alimentación del tanque y desfogue de presión, esta altura no se considera en el nivel debido a que forma una capa de agua medida por el sensor ultrasónico como el nivel inicial del liquido o nivel cero, tomando en cuenta esta altura inicial el sensor de nivel mide adecuadamente el liquido en el tanque.
- La simulación realiza cálculos en diferentes etapas, debido a que funciona de forma similar a un circuito eléctrico que es cargado desde la alimentación, comienza por establecer el nivel deseado en el tanque regulado con el control proporcional integral derivativo, continúa con el cálculo de la función de transferencia. En estas etapas se produce un leve retraso provocado cuando los valores de las ganancias del sistema K_p , τ_i y τ_d son demasiado grandes, produciendo que los cálculos en la programación sean demorosos

- Los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la operación del equipo con la variable nivel (altura del tanque) presentan una excelente exactitud debido a las señales eléctricas alimentadas en cada sistema, con la diferencia que para el caso de las simulación la señal proviene de un generador de señales y en el caso del equipo la señal proviene de un sensor ultrasónico lo que efectúa una variación de resultados entre la simulación y el equipo.

6. CONCLUSIONES

- Como resultado de la función de transferencia para el sistema de control de nivel de líquidos utilizando agua se determinó una oscilación entre 0,955 y 1,0075 en el gráfico característico del sistema.
El sistema se estabiliza en aproximadamente 25 segundos con valores de operación para el control proporcional integral derivativo de $K_p = 10$; $\tau_i = 0,050$; $\tau_d = 0,07$ a partir del nivel deseado.
- A partir de los resultados se concluye, la densidad del líquido de trabajo modifica la función de transferencia, cuando el valor de la densidad es elevado la ecuación característica incrementa sus valores, debido a flujo del fluido.
- De los resultados obtenidos con alcohol (puntas) el sistema se estabiliza en 21 segundos, el gráfico de la función de transferencia oscila entre 0,955 y 1,0125 con los mismos valores de operación utilizados para el agua en el control proporcional integral derivativo.
- El comportamiento del nivel en el tanque de acuerdo a los resultados obtenidos a partir del sensor ultrasónico varía en función del control proporcional integral derivativo, cuando el valor del PID es igual a uno el Set Point se estabiliza con el nivel deseado.
- Durante la operación de control de nivel de líquidos retroalimentada en el equipo es posible controlar el nivel por medio del valor asignado al set point en un rango de 0 a 70 centímetros que son regulados por medio de la función de transferencia y el control proporcional integral derivativo programados en la interface de control. La estabilidad del nivel depende la ganancia del control τ_p y k_p .

- La teoría de control usa funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar el sistema mediante ecuaciones algebraicas en función de Laplace.
- El desarrollo e implementación de modelos matemáticos para describir un proceso es una herramienta útil que nos permite comprender el funcionamiento de dicho proceso sin necesidad de comprometer la instalación de la planta industrial o requerir montar una planta piloto para estudiar diversos escenarios que pudieran comprometer los sistemas de control o su optimización. Sin embargo es posible desarrollar varios modelos matemáticos depende de la manera como se aborde el problema.
- Para el control de nivel de líquidos retroalimentado con alimentación continua, el modelo matemático planteado permite el control PID con gran facilidad ya que puede ajustar los valores de la ganancia proporcional integral y derivativa, tantas veces como se necesario para obtener la mejor repuesta del sistema.
- Los resultados obtenidos a partir del conjunto de modelos matemáticos y señales obtenidas de los instrumentos de control y medición del equipo presentan un porcentaje de error bajo aproximadamente del 2 por ciento en la curva del control proporcional integral derivativo debido a que son retroalimentados por la señal constante de altura del liquido generada por el sensor ultrasónico cada 0,1 segundos lo que permite precisión en el sistema de control.

7. RECOMENDACIONES

- Los parámetros de funcionamiento para el equipo y la simulación del sistema de control son: $K_p = 0,5-30$; $\tau_i = 0,01 - 20$; $\tau_d = 0,01 - 20$ dentro de este rango el control proporcional integral derivativo podrá estabilizar el sistema de forma eficiente, si se excede estos parámetros de operación el sistema se volverá lento debido a que los cálculos del conjunto de modelos matemáticos se realizan paso a paso en bloques.
- Los parámetros de la función de transferencia se pueden modificar fácilmente sin necesidad de realizar cambios en el diagrama de bloques en la pestaña función de transferencia, debido a esto es necesario ingresar valores adecuados al sistema de controles basados en el modelo matemático desarrollado para la programación, de acuerdo la ecuación
$$H(s) = \frac{\tau_i s K_p \tau_p s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}{\tau_p s \tau_i s + \tau_i s + K_p K_c \tau_i s + K_p K_c + K_p K_c \tau_i s \tau_d s}.$$
- Se recomienda tener conocimientos básicos de programación grafica en labview y control automático para operar el sistema de control, esto permitirá evitar errores que podrían modificar la programación, cambiar los modelos matemáticos o dañar los instrumentos de control del sistema.
- Se recomienda manipular con precaución las válvulas de drenaje y desfogue de presión de agua del sistema, de esta manera se evitara una sobrepresión en el sistema de control del equipo, lo que permitirá conservar la bomba y la válvula proporcional de control. Se de utilizar los manómetros instalados en ele equipo en una presión aproximada de 20-40 psi.

- Para un óptimo funcionamiento de la electroválvula proporcional servo accionada de dos vías se recomienda una presión de trabajo entre de 0,5 a 10 bares a una temperatura del fluido de -10 a 80 °C con una viscosidad máxima de 50 cSt.
- La tarjeta de control del equipo se instala en el computador con un driver que se encuentra en el CD del equipo en la carpeta Instalador de tarjeta con el nombre PL-2303 Vista Driver Instalar, se recomienda verificar su instalación para que se pueda configurar el puerto serial en el equipo y exista comunicación entre el equipo y el computador.
- Se recomienda comunicarse con la persona encargada del equipo o profesor en el caso de presentarse mensajes de error, mensajes de falla de carga de programación, mensajes de alerta o mensajes de abortaje, debido a que estos mensajes permiten identificar el problema y solucionarlos evitando daños mas graves.
- Ya que el modulo diseñado tiene fines didácticos se recomienda añadir en el futuro equipos de medición de otras variables, como por ejemplo de temperatura y caudal, para así implementar las aplicaciones de control de dichas variables.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] CORRIPIO, Armando; SMITH. Carlos. Control Automático de Procesos. Primera Edición. Editorial Limusa. México DF, 1991. p. 6.

[2] ÁLVAREZ, Humberto. Pensamiento Estratégico en Mantenimiento. [En línea]. [Fecha de consulta: el 16 de Marzo de 2012 a las 18:45]. Disponible en: <<http://www.ceroaverias.com/articulos/pensamiento.pdf>>

[3] Galeon España, Control en Cascada. [En línea]. [Fecha de consulta: el 24 de Marzo de 2012 a las 16:04]. Disponible en: <http://www.galeon.com/ingprocesos/CONTROL_II/3CASCADA.pdf; <<http://iaci.unq.edu.ar/materias/control1/web/Apuntes/PID.pdf>>

[4] Danfoss Estados Unidos, Data sheet/ Technical leaflet. [En línea]. [Fecha de consulta: el 05 de Febrero de 2012 a las 20:45]. Disponible en: <<http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/04/ICPD300C105.pdf>>

[5] PEREZ, Diego. Sensores de distancia por ultrasonidos. [En línea]. [Fecha de consulta: el 23 de Febrero de 2012 a las 1:45]. Disponible en: <<http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/Trabajos/DiegoPerezDeDiego.pdf>>

[6] FERNANDEZ, PEDRO. Bombas centrífugas y volumétricas. [En línea]. [Fecha de consulta: el 20 de Marzo de 2012 a las 14:05]. Disponible en: <<http://www.termica.webhop.ifo.ve>>

[7] VALDÉS Diana; UGUET Elena, Diseño de Equipos Electrónicos. Segunda Edición. Editorial Pueblo y Educación ISPJAE. La Habana, 1990. pp.1-2.

[8] National Instruments Estados Unidos, Introducción al Labview. [En línea]. [Fecha de consulta: el 02 de Diciembre de 2012 a las 10:00]. Disponible en:<<http://www.inele.ufro.cl/apuntes/LabView/Manuales/Manual.pdf>>

BIBLIOGRAFIA

ÁLVAREZ, Humberto. *Pensamiento Estratégico en Mantenimiento*. [En línea]. [Fecha de consulta: el 16 de Marzo de 2012 a las 18:45]. Disponible en: <<http://www.ceroaverias.com/articulos/pensamiento.pdf>>

ARDILA Roberto. *Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema de control multiproceso*. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Bogotá. 2004. 65 p.

COLCHA José, *Desarrollo de un sistema de laboratorio para el estudio de la dinamica del proceso del nivel de un tanque*. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Escuela de Ingeniería Química. Quito. 2003. 20 p

CORRIPIO, Armando; SMITH. Carlos. *Control Automático de Procesos*. Primera Edición. Editorial Limusa. México DF, 1991. 6 p.

CREUS Antonio. *Instrumentación Industrial*. Segunda Edición. Editorial Marcombo. México, 2000. 30 p.

FERNANDEZ, PEDRO. *Bombas centrífugas y volumétricas*. [En línea]. [Fecha de consulta: el 20 de Marzo de 2012 a las 14:05]. Disponible en: <<http://www.termica.webhop.ifo.>>

GARCIA, Santiago. *Redes para proceso distribuido conexión TCP/IP entre dos estaciones usando Labview*. Segunda Edición. Editorial Alfa Omega. Madrid España, 2004. 8-10 p.

GONZÁLEZ Francisco. *Instrumentación Virtual en la Medición de Nivel de Líquidos*. primera Edición. Editorial JB. México, 2005. 26-28 p.

LÁZARO Antonio, *LabVIEW Programación Gráfica para el Control de Instrumentación*. Primera Edición. Editorial Paraninfo. Madrid España, 1997. 279

Luyben, W.L., *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineer*. Segunda Edición. Editorial Mc Graw Hill. 1969. 73 p.

PEREZ, Diego. *Sensores de distancia por ultrasonidos*. [En línea]. [Fecha de consulta: el 23 de Febrero de 2012 a las 1:45]. Disponible en: <http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/Trabajos/DiegoPerezDeDiego.pdf>

VALDÉS Diana; UGUET Elena. *Diseño de Equipos Electrónicos*. Segunda Edición. Editorial Pueblo y Educación ISPJAE. La Habana, 1990. 1-2 p.

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO SIMULACIÓN EN COMPUTADORA

- ✓ Requerimientos hardware y software:



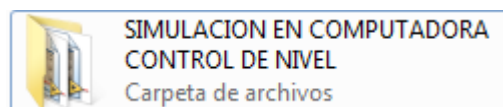
Figura A.1. Requerimientos de hardware y software

- ✓ Funcionamiento de la simulación en computadora

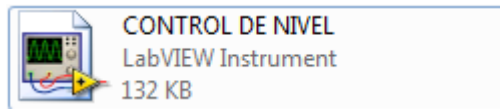
1. Inserte el CD en computadora y habrá la carpeta CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS RETROALIMENTADO CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE



2. Habrá la carpeta SIMULACION EN COMPUTADORA CONTROL DE NIVEL



3. Doble clic en el archivo CONTROL DE NIVEL



4. Realice un clic en la pantalla pestaña función de transferencia

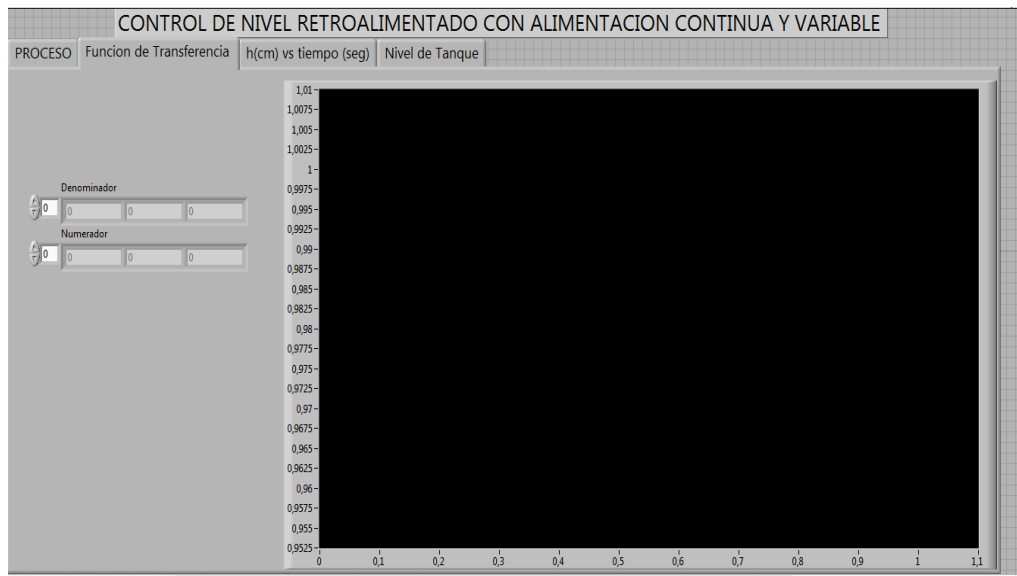
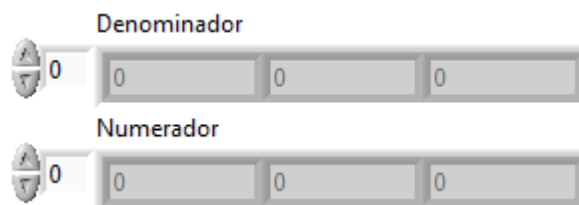




Figura A.2. Pestaña función de transferencia

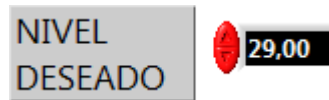
5. Ingrese los valores de la función de transferencia en el numerador y el denominador



6. Clic en la pestaña PROCESO e ingrese los valores de K_c , τ_i , τ_d

7. Clic en el botón  para dar inicio a la simulación


8. Para modificar el nivel deseado clic en el botón  29,00 e ingresar el nuevo nivel



9. Clic en la pestaña función de transferencia permite mirar la gráfica de control.

10. Clic en la pestaña h (cm) vs tiempo (seg) permite mirar la gráfica altura en función del tiempo.

11. Clic en la pestaña Nivel de tanque permite mirar el nivel del líquido.

12. Para detener la simulación clic en el botón .

ANEXO B. MANUAL DE USUARIO PARA EL EQUIPO

✓ Requerimientos hardware y software:



Figura B.1. Requerimientos hardware y software equipo

✓ Funcionamiento del equipo

1. Regule las válvulas de alivio de presión del equipo (40% de apertura)

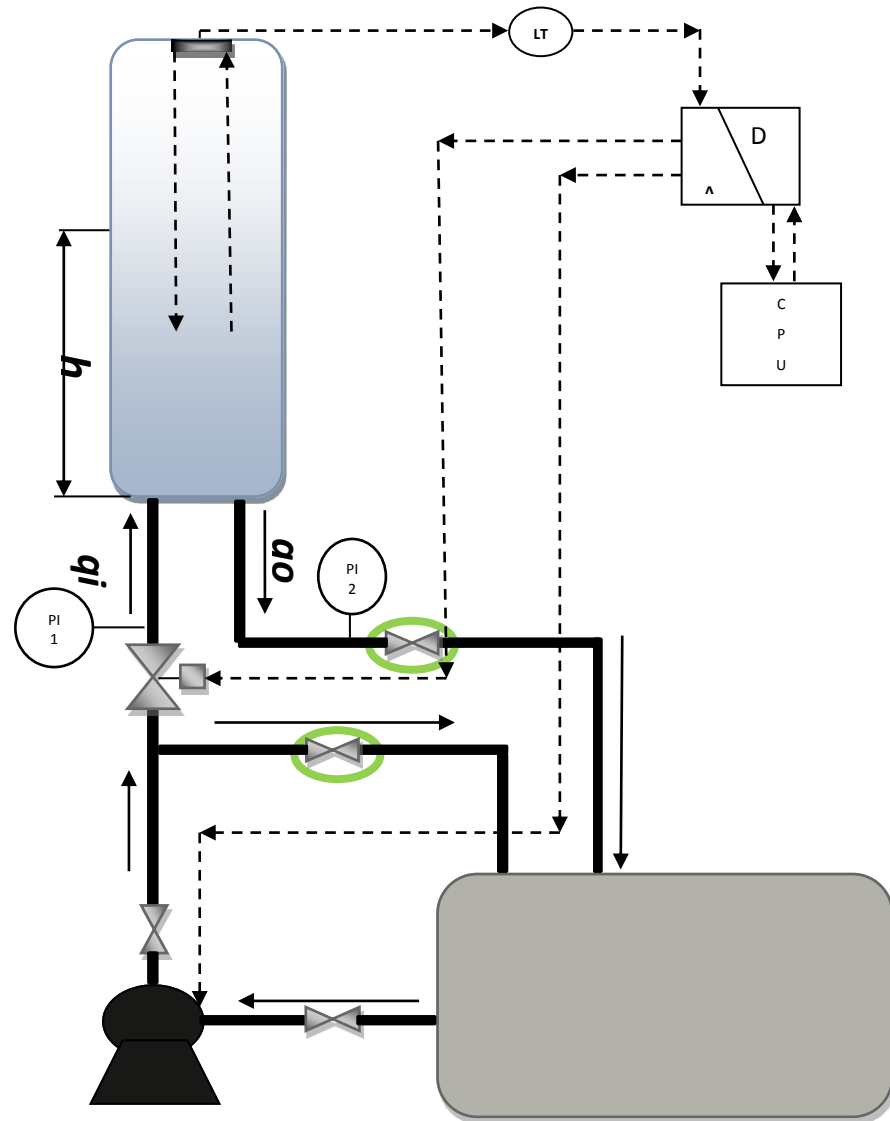


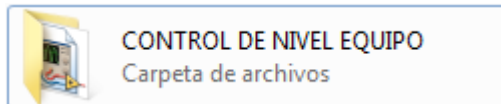
Figura B.2. Válvulas de alivio de presión en el equipo

2. Conectar el cable de poder a la alimentación eléctrica 110 V.

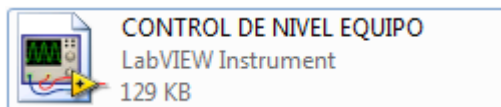
3. Inserte el CD en computadora y habrá la carpeta CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS RETROALIMENTADO CON ALIMENTACIÓN CONTINUA Y VARIABLE



4. Habrá la carpeta CONTROL DE NIVEL EQUIPO



5. Doble clic en el archivo CONTROL DE NIVEL EQUIPO



6. Se presenta la siguiente pantalla

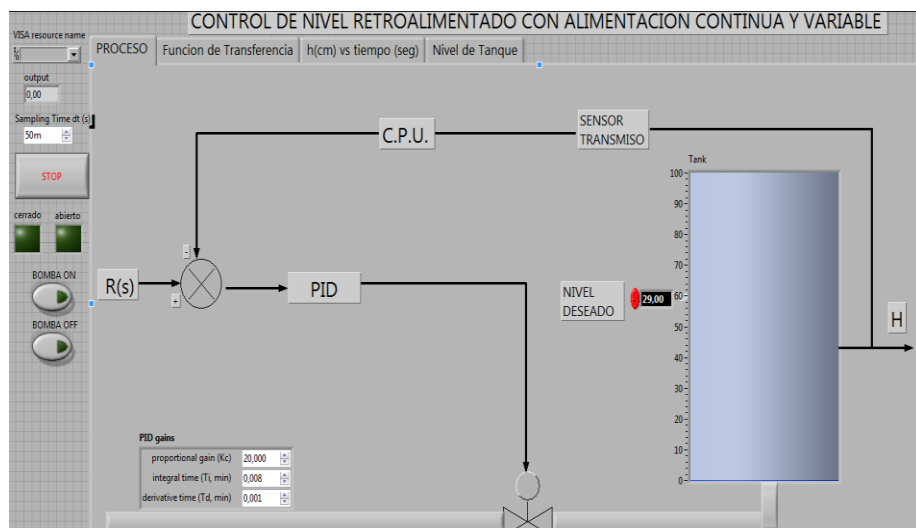



Figura B.3. Pantalla de control equipo

7. Conecte el cable serial con el puerto USB al computador y el puerto serial a la tarjeta de control

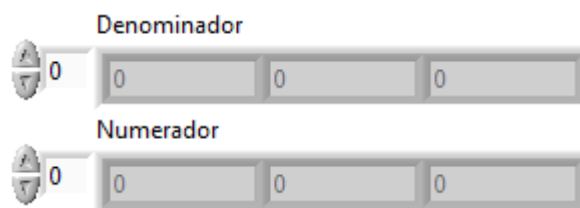
8. Clic en el botón  para encender el sistema de control programado

9. Realice un clic en la pantalla pestaña función de transferencia

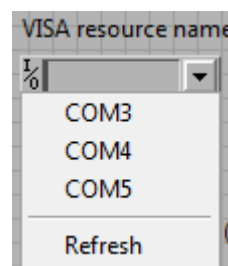


Figura B.4. Pestaña función de transferencia equipo


10. Ingrese los valores de la función de transferencia en el numerador y el dominador




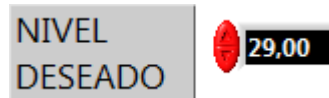
11. Clic en el icono Visa resource



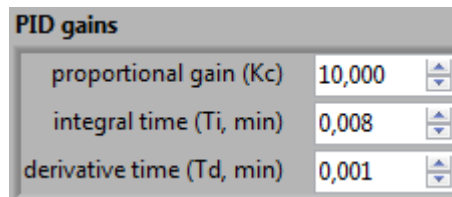
12. Clic en la opción Refresh repetidamente hasta automáticamente reconozca el puerto.

13. Clic en el botón  para encender la bomba.

14. Para modificar el nivel deseado clic en el botón  e ingresar el nuevo nivel



15. Clic en la pestaña PROCESO e ingrese los valores de K_c , τ_i , τ_d




16. Clic en la pestaña función de transferencia permite mirar la gráfica de control.

17. Clic en la pestaña h (cm) vs tiempo (seg) permite mirar la gráfica altura en función del tiempo, control PID y Set Point.

18. Clic en la pestaña salida del controlador permite observar una grafica de salida del control de la planta.

19. Clic en el botón  , clic en el botón 

20. Clic en el botón  para apagar la bomba.

21. Para detener el programa de control clic en el botón 

ANEXO C. EQUIPO

